

**MARIA CAROLINA COELHO LOFF BARRETO**

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E BASTARDAS  
FACE À ACÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Perfil de Construção, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Lisboa, 2010



## **DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E BASTARDAS FACE À ACÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Perfil de Construção, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Maria Carolina Coelho Loff Barreto

Orientador Científico: Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho (DEC-FCT/UNL)

Co-orientadora Científica: Doutora M<sup>a</sup> Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues (ESTBarreiro/IPS)

Junho de 2010





## **AGRADECIMENTOS**

A presente dissertação foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), onde foram efectuados a maioria dos ensaios de caracterização dos materiais de construção utilizados e dos provetes das várias argamassas.

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, em particular:

Ao Professor Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Auxiliar do DEC-FCT/UNL, meu Orientador Científico, e à Professora Paulina Faria, Professora Coordenadora da ESTBarreiro/IPS, minha Co-orientadora Científica, pelo apoio, incentivo e orientação do trabalho realizado, bem como por todos os conselhos e ensinamentos transmitidos e pela total disponibilidade sempre demonstrada.

Ao Eng. Mário Marques da empresa LUSICAL pelo fornecimento de sacos de cal aérea para a execução dos provetes.

Ao Eng. Victor Vermelhudo da empresa SECIL-Outão pela disponibilidade demonstrada ao possibilitar a execução dos ensaios de resistência à tracção por flexão e compressão no laboratório da empresa.

Ao Prof. Vasco Rato, do ISCTE, pela disponibilização de algum material bibliográfico, à Eng<sup>a</sup>. Ana Brás pela disponibilização de cal hidráulica, bem como pelo esclarecimento de dúvidas e disponibilidade sempre demonstrada e ao Prof. Luís Neves do DEC-FCT/UNL pelo esclarecimento de dúvidas relativamente à programação da câmara climática.

Ao Sr. Jorge Silvério e ao Sr. José Gaspar, do DEC-FCT/UNL, pelo auxílio na preparação e realização de alguns ensaios da campanha experimental. À D. Maria da Luz e à D. Carla Figueiredo, secretárias do DEC-FCT/UNL, pela disponibilidade prestada.

Ao meu Pai, aos meus Irmãos e à restante família, ao António e a todos os meus amigos pelo apoio demonstrado.



# Durabilidade de Argamassas de Cal Aérea e Bastardas

## Face à Acção de Sais Solúveis

### RESUMO

O tema surge na sequência de um trabalho de investigação, sobre a análise experimental de diversas soluções de reforço de paredes de alvenaria “ordinária”. Numa destas soluções de reforço foi utilizado reboco de argamassa bastarda, armado com fibra de vidro, aplicado sobre a alvenaria “ordinária” (esta constituída por pedra e grande percentagem de argamassa de cal aérea).

Nesse sentido, o presente trabalho estuda a durabilidade de provetes de argamassas bastardas face à acção de sais solúveis, comparando-a com a durabilidade de provetes de argamassa de cal aérea, tendo em vista a avaliação da compatibilidade dessas argamassas com a alvenaria “ordinária” de modo a poderem ser utilizadas (envolvendo uma malha) em soluções de reforço estrutural.

Assim, foram caracterizadas as matérias-primas e diversos provetes de argamassa de cal aérea (CA), argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea (CH) e argamassa bastarda de cimento e cal aérea (CI). Este estudo envolveu aspectos de caracterização mecânica, física e química das argamassas, que foram comparados entre si e com resultados de outros autores.

Para além de aspectos de compatibilidade das argamassas com as paredes antigas, de forma a garantir-se a protecção e durabilidade das alvenarias, deu-se particular relevância à caracterização da resistência das argamassas face aos sais solúveis, de forma a poder indicar a durabilidade das próprias argamassas utilizadas em soluções de reforço.

**Palavras-chave:** alvenaria de edifício antigo, argamassa, durabilidade, cloretos, sulfatos.

# Durability of Air-Lime and Mixed Mortars In the Presence of Soluble Salts

## ABSTRACT

This subject arises in response to a research study on the experimental analysis with simple and strengthening models of rubble stone masonry. In one of these models, mixed mortar rendering reinforced with glass fibre applied over rubble stone masonry (made of stone and a high percentage of air-lime mortar) was used.

Accordingly, this research work studies the durability of different mixed mortars in the presence of soluble salts when compared with the durability of an air-lime mortar, viewing to assess their compatibility with the rubble stone masonry, so that they can be used (along with a glass fibre) in structural strengthening solutions.

Thus, raw materials and several air-lime mortars (CA), mixed hydraulic and air-lime mortars (CH) and mixed cement and air-lime mortars (CI) were characterized. This study involved aspects of mechanical, physical and chemical characterization of mortars, which were compared with each other and with other authors' results.

In addition to compatibility issues with the mortar of ancient buildings' walls, so as to provide protection and durability of masonry, particular relevance was given to the characterization of mortars resistance regarding soluble salts, so that the durability of the mortars used in structural strengthening solutions could be indicated.

**Keywords:** Ancient building masonry, mortar, durability, chlorides, sulphates.

### Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials  
CA – provete de argamassa de cal aérea e areia  
CH – provete de argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia  
CI – provete de argamassa de cimento, cal aérea e areia  
DEC – Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL  
ESTBarreiro – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do IPS  
FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL  
IPS – Instituto Politécnico de Setúbal  
PVC – policloreto de vinilo  
UNL – Universidade Nova de Lisboa

### Notações escalares latinas

A – área  
a/l – relação água/ligante  
b – lado da secção quadrada do provete  
Ba – baridade  
C – compacidade  
c – distância à linha neutra  
D – máxima dimensão do agregado; diâmetro dos poros  
DP – desvio padrão  
d – mínima dimensão do agregado; dia; média dos quatro valores de espalhamento medido  
 $E_{din}$  – módulo de elasticidade dinâmico  
Esp – espalhamento  
 $F_c$  – força de rotura à compressão  
 $F_f$  – força de rotura à flexão  
 $f_0$  – frequência de ressonância longitudinal  
g – aceleração da gravidade  
h – lado da secção quadrada do provete; hora

Hr – humidade relativa

I – momento de inércia

L – comprimento do provete; distância entre os apoios do suporte do provete (flexão)

IS – índice de secagem

M – massa do recipiente cheio de material (na baridade); momento flector (flexão)

$M_0$  – massa do provete seco

$M_1$  – massa correspondente à pesagem hidrostática; massa do provete seco após imersão na solução saturada de cloreto de sódio

$M_2$  – massa correspondente à pesagem saturada

$M_f$  – módulo de finura do agregado

$M_i$  – massa do provete no instante  $t_i$  (em contacto com água); massa do provete no instante  $t_i$  (ao longo da secagem)

$M_s$  – massa do provete saturado

$M_t$  – quantidade de água absorvida no instante  $t_i$

min – minuto

MVA – massa volúmica aparente

MVR – massa volúmica real

$n_s$  – número de pesagens

P – porosidade; pressão exercida

PA – porosidade aberta

PC – profundidade de carbonatação

$R_c$  – resistência à compressão

$R_t$  – resistência à tracção por flexão

rpm – rotação por minuto

$Q_i$  – teor de água do provete; quantidade de água no interior do provete no instante  $i$

$Q_{máx}$  – quantidade de água inicial

s – segundo

T – temperatura

t – tempo

$t_i$  – tempo de ensaio

$t_f$  – tempo final de ensaio

V – volume do recipiente (na baridade)

VA – valor assintótico

## **Notações escalares gregas**

$\theta$  – ângulo de contacto entre o mercúrio e as paredes dos poros

$\rho$  – massa volúmica

$\sigma$  – tensão superficial do mercúrio

$\sigma_c$  – resistência à compressão

$\sigma_f$  – resistência à tracção por flexão





### **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TRABALHO**

1.1 – Considerações iniciais.....	1
1.2 – Construções de alvenaria de pedra.....	1
1.2.1 – Principais anomalias estruturais das construções de alvenaria “ordinária”.....	4
1.3 – Efeito dos sais solúveis nas alvenarias dos edifícios antigos.....	5
1.3.1 – Acção do cloreto de sódio.....	10
1.3.2 – Acção do sulfato de sódio.....	10
1.4 – Principais técnicas de reabilitação estrutural de construções de alvenaria “ordinária”.....	12
1.5 – Argamassas de substituição utilizadas na reabilitação estrutural de edifícios antigos.....	15
1.6 – Enquadramento do trabalho experimental desenvolvido.....	17
1.7 – Motivação e objectivos.....	21
1.8 – Organização do trabalho.....	21

### **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1 – Considerações iniciais.....	23
2.2 – Trabalhos de referência.....	23

### **CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA. ENQUADRAMENTO DOS RESULTADOS**

3.1 – Considerações iniciais.....	37
3.2 – Tipos de provetes e materiais utilizados na preparação das argamassas.....	37
3.2.1 – Areias de rio e de areeiro.....	37
3.2.2 – Cal aérea.....	38
3.2.3 – Cal hidráulica.....	40
3.2.4 – Cimento.....	41
3.2.5 – Água.....	43
3.3 – Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas.....	43
3.3.1 – Análise granulométrica das areias.....	44
3.3.2 – Baridade das areias e dos ligantes.....	46
3.4 – Preparação dos provetes de argamassa (amassadura).....	49
3.4.1 – Argamassa de cal aérea e areia.....	52

3.4.2 – Argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia.....	53
3.4.3 – Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia.....	54
3.5 – Caracterização das argamassas frescas e condições de cura.....	54
3.6 – Caracterização das argamassas endurecidas.....	58
3.6.1 – Características mecânicas.....	59
3.6.2 – Características físicas.....	66
3.6.3 – Características químicas.....	82
3.7 – Enquadramento dos resultados.....	85

#### **CAPÍTULO 4 – DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS FACE AOS SAIS SOLÚVEIS. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

4.1 – Considerações iniciais.....	99
4.2 – Provetes utilizados.....	99
4.3 – Ensaio de durabilidade face aos sais solúveis.....	100
4.3.1 – Resistência aos cloretos.....	100
4.3.2 – Resistência aos sulfatos.....	112

#### **CAPÍTULO 5 – COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

5.1 – Considerações iniciais.....	123
5.2 – Comentários finais e conclusões.....	123
5.3 – Objectivos propostos e objectivos alcançados.....	125
5.4 – Desenvolvimentos futuros.....	125

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>127</b>
--	------------

<b>ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS PROJETOS DE ARGAMASSA.....</b>	<b>135</b>
--	------------

<b>ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS FACE AOS SAIS SOLÚVEIS.....</b>	<b>151</b>
---	------------

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Construção de alvenaria “ordinária” .....	1
Fig. 1.2 – Componentes de alvenaria de pedra irregular.....	2
Fig. 1.3 – Representação esquemática da formação de eflorescências e criptoflorescências.....	8
Fig. 1.4 – Anomalias provocadas pela acção dos sais.....	9
Fig. 1.5 – Representação esquemática de eflorescências e criptoflorescências em paredes de alvenaria imersas num terreno molhado e expostas à secagem.....	9
Fig. 1.6 – Construção dos muretes de alvenaria “ordinária” utilizados no principal trabalho de referência desta dissertação .....	17
Fig. 1.7 – Representação esquemática dos muretes grandes e pequenos.....	18
Fig. 1.8 – Aspecto dos muretes da solução de reforço IV, antes do início da aplicação da segunda camada de argamassa.....	19
Fig. 1.9 – Representação esquemática da caracterização da solução de reforço IV.....	19
Fig. 1.10 – Aspecto final dos muretes da solução de reforço IV.....	20
Fig. 2.1 – Resultados do ensaio de espalhamento da argamassa de cal aérea e areia.....	24
Fig. 2.2 – Resultados do ensaio de resistência aos sulfatos das argamassas estudadas por F. Henriques e V. Rato em termos de perda de massa.....	30
Fig. 3.1 – Areias de rio e de areeiro utilizadas na amassadura das argamassas.....	38
Fig. 3.2 – Cal aérea hidratada utilizada na amassadura das argamassas.....	39
Fig. 3.3 – Cal hidráulica utilizada na amassadura das argamassas.....	40
Fig. 3.4 – Cimento utilizado na amassadura das argamassas.....	42
Fig. 3.5 – Contributos dos principais constituintes do clínquer para as resistências mecânicas do cimento ao longo do tempo.....	43
Fig. 3.6 – Ensaio de análise granulométrica das areias.....	45
Fig. 3.7 – Curvas granulométricas das areias de rio e de areeiro.....	46
Fig. 3.8 – Ensaio de determinação da baridade das areias e dos ligantes.....	48
Fig. 3.9 – Baridade dos agregados utilizados nas argamassas.....	49
Fig. 3.10 – Baridade dos ligantes utilizados nas argamassas.....	49
Fig. 3.11 – Moldes utilizados para a execução dos provetes de argamassa.....	50
Fig. 3.12 – Misturador mecânico de argamassas.....	52
Fig. 3.13 – Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas frescas.....	55

Fig. 3.14 – Valores de espalhamento das argamassas frescas.....	56
Fig. 3.15 – Moldagem e compactação mecânica dos provetes.....	57
Fig. 3.16 – Condições de temperatura e humidade relativa da sala com ambiente condicionado	57
Fig. 3.17 – Provetes desmoldados utilizados na 1ª série de ensaios de caracterização.....	58
Fig. 3.18 – Provetes desmoldados durante o processo de cura.....	58
Fig. 3.19 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	61
Fig. 3.20 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade.....	62
Fig. 3.21 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade.....	62
Fig. 3.22 – Ensaio para determinação das tensões de resistência à tracção por flexão e à compressão, neste caso referente à 1ª série de provetes.....	64
Fig. 3.23 – Resistências mecânicas médias dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade.....	65
Fig. 3.24 – Resistências mecânicas médias dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade.....	65
Fig. 3.25 – Medição da variação dimensional linear dos provetes.....	67
Fig. 3.26 – Variações dimensionais lineares dos provetes da 1ª série.....	67
Fig. 3.27 – Ensaio de determinação das massas volúmicas real, aparente e porosidade aberta.....	70
Fig. 3.28 – Valores médios das massas volúmicas real e aparente dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 90 dias de idade.....	71
Fig. 3.29 – Valores médios da porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 90 dias de idade.....	71
Fig. 3.30 – Valores médios das massas volúmicas real e aparente dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade.....	71
Fig. 3.31 – Valores médios da porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade.....	72
Fig. 3.32 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	74
Fig. 3.33 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	74
Fig. 3.34 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio.....	75
Fig. 3.35 – Resultados médios do coeficiente de absorção de água (1ª série).....	75
Fig. 3.36 – Resultados médios do valor assintótico (1ª série).....	75

Fig. 3.37 – Evolução da temperatura e humidade relativa do laboratório 1.16, durante o ensaio de secagem das argamassas.....	77
Fig. 3.38 – Ensaio de secagem dos provetes de argamassas.....	78
Fig. 3.39 – Resultados médios do ensaio de secagem dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 108 dias de idade.....	78
Fig. 3.40 – Resultados médios do índice de secagem dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 108 dias de idade.....	79
Fig. 3.41 – Porosímetro de mercúrio e penetrómetro preparados para o início do ensaio.....	81
Fig. 3.42 – Exemplo de curva de porometria.....	82
Fig. 3.43 – Representação esquemática da evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo em provetes prismáticos de argamassa com 16cmx4cmx4cm .....	83
Fig. 3.44 – Ensaio de determinação da profundidade de carbonatação.....	84
Fig. 3.45 – Representação esquemática da secção transversal dos provetes prismáticos de argamassa para o traçado dos gráficos de profundidade de carbonatação.....	84
Fig. 3.46 – Profundidade de carbonatação dos provetes de argamassa CA7 e CA8 aos 30, 63 e 90 dias.....	84
Fig. 3.47 – Comparação de valores do ensaio de espalhamento [%] com vários autores.....	89
Fig. 3.48 – Comparação de valores do ensaio de massa volúmica aparente [kg/m³] com vários autores.....	90
Fig. 3.49 – Comparação de valores do ensaio de porosidade aberta [%] com vários autores.....	91
Fig. 3.50 – Comparação de valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ] com vários autores.....	92
Fig. 3.51 – Comparação de valores do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico [MPa] com vários autores .....	93
Fig. 3.52 – Comparação de valores do ensaio de resistência à tracção por flexão [MPa] e de resistência à compressão [MPa] com vários autores.....	94
Fig. 3.53 – Comparação de valores do ensaio de profundidade de carbonatação [mm] com vários autores.....	96
Fig. 4.1 – Ensaio de determinação da resistência dos provetes aos cloretos.....	101
Fig. 4.2 – Percentagem média de cloretos retidos nos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série).....	102
Fig. 4.3 – Resistência dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série) face aos cloretos – variação de massa.....	103

Fig. 4.4 – Vista geral dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série), antes do início do ensaio de resistência aos cloretos.....	103
Fig. 4.5 – Evolução dos provetes de argamassa CA-1 (1ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos.....	104
Fig. 4.6 – Evolução dos provetes de argamassa CH-1 (1ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos.....	105
Fig. 4.7 – Evolução dos provetes de argamassa CI-1 (1ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos (1ª série).....	106
Fig. 4.8 – Percentagem média de cloretos retidos nos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série).....	107
Fig. 4.9 – Resistência dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) face aos cloretos – variação de massa.....	108
Fig. 4.10 – Vista geral dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série), antes do início do ensaio de resistência aos cloretos.....	108
Fig. 4.11 – Evolução dos provetes de argamassa CA (2ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos.....	109
Fig. 4.12 – Evolução dos provetes de argamassa CH (2ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos.....	110
Fig. 4.13 – Evolução dos provetes de argamassa CI (2ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos.....	111
Fig. 4.14 – Ensaio de determinação da resistência dos provetes aos sulfatos.....	113
Fig. 4.15 – Resistência dos provetes de argamassa CA-2, CH-2 e CI-2 (1ª série) face aos sulfatos – variação de massa.....	114
Fig. 4.16 – Vista geral dos provetes de argamassa CA-2, CH-2 e CI-2 (1ª série) antes do início do ensaio de resistência aos sulfatos.....	114
Fig. 4.17 – Evolução dos provetes de argamassa CA-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos.....	115
Fig. 4.18 – Evolução dos provetes de argamassa CH-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos.....	116
Fig. 4.19 – Evolução dos provetes de argamassa CI-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos.....	117

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados de ensaios de caracterização das areias.....	24
Tabela 2.2 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa de assentamento endurecida.....	24
Tabela 2.3 – Resultados de ensaios de caracterização das areias utilizadas na argamassa de reboco da solução de reforço IV.....	25
Tabela 2.4 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida utilizada na solução de reforço IV.....	25
Tabela 2.5 – Resultados do ensaio de baridade dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria.....	26
Tabela 2.6 – Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por P. Faria.....	26
Tabela 2.7 – Resultados de ensaios de resistência aos cloretos das argamassas estudadas por P. Faria.....	27
Tabela 2.8 – Resultados de ensaios de resistência aos sulfatos das argamassas estudadas por P. Faria.....	27
Tabela 2.9 – Resultados de ensaios de resistência aos sulfatos das argamassas estudadas por P. Faria.....	28
Tabela 2.10 – Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por V. Rato.....	29
Tabela 2.11 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida estudada por F. Henriques e V. Rato.....	30
Tabela 2.12 – Resultados de ensaios de caracterização aos 60 dias de idade da argamassa endurecida estudada por C. Guerreiro <i>et al.</i> .....	31
Tabela 2.13 – Resultados de ensaios de resistência aos sais aos 60 dias de idade da argamassa estudada por C. Guerreiro <i>et al.</i> .....	31
Tabela 2.14 – Resultados de ensaios de caracterização aos 120 dias de idade da argamassa endurecida estudada por C. Guerreiro <i>et al.</i> .....	32
Tabela 2.15 – Resultados de ensaios de resistência aos sais aos 120 dias de idade da argamassa estudada por C. Guerreiro <i>et al.</i> .....	32
Tabela 2.16 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa estudada por T. Pereira...	33
Tabela 2.17 – Resultados de ensaios de caracterização de argamassas de substituição ensaiadas em laboratório.....	34

Tabela 3.1 – Características das areias de rio e de areeiro.....	46
Tabela 3.2 – Provetes utilizados na 1ª série de ensaios.....	50
Tabela 3.3 – Provetes utilizados na 2ª série de ensaios.....	50
Tabela 3.4 – Massa de cada material utilizada na 1ª amassadura prévia da argamassa de cal aérea e areia.....	52
Tabela 3.5 – Massa de cada material utilizada na 2ª amassadura e na amassadura final da argamassa de cal aérea e areia .....	53
Tabela 3.6 – Massa de cada material utilizada na amassadura final da argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia .....	53
Tabela 3.7 – Massa de cada material utilizada na amassadura final da argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia .....	54
Tabela 3.8 – Características estudadas nas argamassas endurecidas.....	59
Tabela 3.9 – Comparação das características dos provetes de argamassa de cal aérea e areia.....	86
Tabela 3.10 – Comparação das características dos provetes de argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia.....	87
Tabela 3.11 – Comparação das características dos provetes de argamassa de cimento, cal aérea e areia.....	88
Tabela 3.12 – Enquadramento dos resultados.....	97
Tabela 4.1 – Provetes utilizados nos ensaios de resistência aos cloretos.....	99
Tabela 4.2 – Provetes utilizados nos ensaios de resistência aos sulfatos.....	99
Tabela 4.3 – Resistência dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série) face aos cloretos – média da variação de massa.....	102
Tabela 4.4 – Resistência dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) face aos cloretos – média da variação de massa.....	107
Tabela 4.5 – Resistência dos provetes de argamassa CA-2, CH-2 e CI-2 (1ª série) face aos sulfatos – média da variação de massa.....	113



# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

### 1.1 – Considerações iniciais

O tema desta dissertação surge na sequência e como continuação de um trabalho de investigação recentemente concluído no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC-FCT/UNL) sobre a análise experimental de diversas soluções de reforço de paredes de alvenaria “ordinária” [35].

Como forma de enquadrar o estudo experimental desenvolvido na presente dissertação, é efectuada inicialmente neste capítulo uma pequena abordagem sobre as construções de alvenaria de pedra, em particular das construções de alvenaria “ordinária”, as suas principais anomalias e técnicas de reabilitação estrutural. É ainda feita uma abordagem à temática dos sais e suas implicações nas construções, sendo este o tema principal desta dissertação. Por fim, é realizada uma breve descrição do trabalho de investigação referido anteriormente.

O enquadramento teórico do tema inclui também a análise de alguns trabalhos de investigação sobre este assunto, que é apresentada no Capítulo II.

No final deste capítulo introdutório refere-se, ainda, a motivação, os objectivos a alcançar e a organização geral do trabalho.

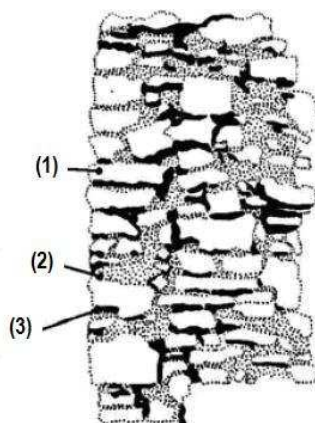
### 1.2 – Construções de alvenaria de pedra

Para enquadrar o trabalho de investigação [35] que foi realizado (referido na secção 1.6), é importante fazer uma breve abordagem sobre as construções de alvenaria de pedra, mais em particular da alvenaria “ordinária” (muitas vezes também designada por alvenaria de pedra irregular), fig. 1.1, pois é sobre este tipo de paredes que incide o estudo.



Fig. 1.1 – Construção de alvenaria “ordinária”

Entende-se por “alvenaria argamassada” a união de um conjunto de elementos (pedras, blocos, tijolos de barro seco ou cozido em fornos) ligados entre si por intermédio de argamassa com ligantes diversos (simples ou misturados entre si), com propriedades mecânicas capazes de criar elementos estruturais, fig.1.2 [12, 35, 42].



1 – pedra; 2 – argamassa; 3 – vazios

Fig. 1.2 – Componentes de alvenaria de pedra irregular [43]

Os principais ligantes utilizados ao longo do tempo nas construções de alvenaria foram o saibro e as argilas, evoluindo posteriormente para o gesso e outros ligantes aéreos (obtidos pela cozedura de rochas calcárias a uma temperatura de cerca de  $894^{\circ}\text{C}$ ) [11, 28, 35]. Mais tarde, quando os fornos conseguiam alcançar temperaturas mais elevadas, produziram-se os ligantes hidráulicos, primeiro a cal hidráulica (com temperatura de fabrico de cerca de  $1200^{\circ}\text{C}$ ), e finalmente o cimento (com temperatura de cozedura de  $1450^{\circ}\text{C}$ ) [11]. Nesta altura, passou também a ser frequente a mistura de ligantes aéreos com ligantes hidráulicos [35].

As paredes dos edifícios antigos tinham uma constituição e um modelo de funcionamento diferentes das actuais estruturas de betão armado. Um aspecto importante está relacionado com a protecção contra a humidade. As paredes dos edifícios actuais são construídas de forma a tentar impedir a entrada da humidade, por exemplo, através de cortes de capilaridade junto às fundações e, por vezes, pelo uso de revestimentos de estanquidade ou de impermeabilização [32, 59]. As paredes dos edifícios antigos, sendo mais porosas, com maior espessura e sem cortes de capilaridade, admitiam a entrada de água para o interior da alvenaria mas sem uma permanência prolongada, pois promoviam a sua fácil e rápida secagem [59].

As paredes exteriores tinham funções estruturais e de protecção do exterior e das condições climáticas [12, 59].

A alvenaria estrutural ou resistente tem, como características principais, uma boa resistência à compressão (dependente do volume de vazios) e fracas resistências à tracção e ao corte [43].

As construções de alvenaria de pedra dividem-se principalmente em [35, 36]:

- **construções de alvenaria de pedra seca ou mal argamassada:** caracterizadas pelo assentamento das pedras com pouca ou, por vezes, nenhuma argamassa; nestas construções era usual a utilização de xisto ou granito nas paredes resistentes;
- **construções de alvenaria “ordinária”, alvenaria de pedra irregular ou alvenaria de “pedra e cal”:** construídas com pedras, na maioria pedra calcária, de formas e dimensões irregulares, ligadas entre si por argamassa de cal e areia, em geral ao traço 1:3; estas construções representam uma grande parte das construções antigas de alvenaria de pedra existentes no nosso País;
- **construções de alvenaria mista:** caracterizadas pela utilização de dois ou mais materiais, entre os quais pedras de várias origens (granito, calcário, xisto), elementos cerâmicos de barro vermelho (tijoleiras e tijolos), argamassa (geralmente com base em cal aérea), madeira e ferro; o principal exemplo no nosso País de construções de alvenaria mista (alvenaria e madeira), são os edifícios da Baixa Pombalina;
- **construções de enxilharia ou silharia:** constituídas por pedras grosseiramente desbastadas (designadas por enxilhares ou silhares), geralmente com forma de prismas rectangulares, com um “aparelho” pouco cuidado e que, na maior parte dos casos, eram rebocadas;
- **construções de cantaria:** constituídas por pedras aparelhadas de grandes dimensões e forma paralelepípedica; estas construções são representativas de edifícios monumentais ou de grande valor histórico; neste tipo de construções, a cantaria era apenas utilizada nos paramentos superficiais e em elementos singulares, tais como em cunhais e colunas, sendo os seus interiores, em geral, constituídos por alvenaria “ordinária”; a enxilharia distingue-se da cantaria por apresentar paredes, em geral, mais toscas e pela maior irregularidade nas dimensões e no assentamento das pedras nas fiadas.

Neste trabalho é dada uma maior importância às construções de alvenaria “ordinária”, visto ter sido a solução construtiva caracterizada no principal trabalho de investigação de referência, ao qual este trabalho pretende dar continuidade, em aspectos relativos à durabilidade face aos sais solúveis.

### 1.2.1 – Principais anomalias estruturais das construções de alvenaria “ordinária”

As anomalias estruturais ocorrem quando as tensões provocadas pelas acções excedem a resistência dos materiais em zonas significativas (devido ao aumento das acções ou à diminuição da resistência), sendo tanto maiores quanto pior é a qualidade da construção, ou devido ao envelhecimento dos materiais, que provoca alteração da sua resistência mecânica [35].

As anomalias estruturais mais frequentes nas construções de alvenaria “ordinária” são [4, 34, 35, 36, 37]:

- **fendilhação** em paredes e fundações, resultante da acção sísmica, assentamento diferencial de fundações, vibrações devidas ao tráfego rodoviário de veículos pesados e/ou obras nas proximidades, efeitos de remodelações interiores mal concebidas (por exemplo a remoção de elementos resistentes); a fendilhação pode ocorrer na zona corrente das paredes, nos pontos mais frágeis, como vãos de portas, devido à elevada concentração de tensões, e na ligação entre paredes ortogonais;
- **esmagamento** que ocorre, geralmente, em zonas localizadas como pontos de aplicação de cargas concentradas elevadas, como por exemplo a descarga de vigas em paredes sem a existência de apoios adequados para as vigas;
- **desagregação** que pode resultar da progressão e agravamento da fendilhação da parede e/ou da ausência de conservação e manutenção; nos casos mais frequentes, a desagregação das alvenarias é devida à acção dos agentes climáticos, agravada pela acção da água, quer de infiltração, chuvas ou humidade do terreno ascendente por capilaridade, que provocam remoção dos finos da argamassa de assentamento;
- **degradação de elementos de madeira por agentes biológicos** que normalmente está associada à presença de humidade nas paredes, sendo por isso esta anomalia a mais frequente em paredes exteriores, mais sujeitas ao humedecimento provocado pela água da chuva; a água vai afectar as paredes quando estiver no seu interior em permanência e/ou em contacto com a madeira;
- **corrosão de elementos metálicos**, anomalia comum em escadas ou varandas metálicas, que não tenham protecção adequada; pode também ocorrer nos elementos de travamento das paredes (ferrolhos metálicos), levando a um aumento de volume desses elementos e, consequentemente, à fendilhação dos revestimentos.

Dentro das anomalias estruturais referidas as que têm maior relevância para este estudo são as que estão relacionadas ou são agravadas com a presença da água.

Com efeito, a presença de água em contacto com os elementos de construção constitui um problema importante, tendo como principais consequências a diminuição da resistência mecânica, o transporte de sais existentes nos materiais (de que normalmente resulta a degradação por cristalização de sais após a secagem da água), a dilatação/retração do material (provocando novas fendilhações que originam maiores infiltrações) e o desenvolvimento de microorganismos e vegetação parasitária em meio húmido [13].

A água pode ter várias origens. Entre elas podem surgir águas provenientes de infiltrações através de fendilhação existente, humidade de precipitação, humidade de condensação ou humidade do terreno que ascende por capilaridade, podendo causar graves alterações no estado da construção [4, 13, 19].

Por exemplo, no caso da humidade de precipitação, esta “procura” os pontos fracos da construção das paredes (fendas e vazios), criando caminhos preferenciais, geralmente através das juntas de argamassa entre pedras ou tijolos. No seu trajecto, a água vai dissolvendo os sais solúveis, provenientes do solo ou das argamassas, colocando-os em contacto com o reboco. À medida que vai “seguindo o seu caminho”, a água vai ficando cada vez mais rica em sais dissolvidos, até que as condições de temperatura e humidade ambientes permitem a sua evaporação e a consequente deposição dos sais previamente dissolvidos [4, 36].

Na secção 1.3 descreve-se com maior pormenor o efeito dos sais solúveis nas alvenarias dos edifícios antigos.

### **1.3 – Efeito dos sais solúveis nas alvenarias dos edifícios antigos**

As paredes (e as fundações) de alvenaria dos edifícios antigos podem apresentar uma grande quantidade de sais solúveis, principalmente no caso dos materiais que as constituem terem estado sujeitos ao longo do tempo à sua deposição por transporte, por capilaridade a partir do terreno ou devido ao efeito da poluição atmosférica ou até mesmo estarem nos próprios materiais de construção (argamassas, tijolos cerâmicos, por exemplo). As acções mecânica e química provocam grandes danos nas superfícies ou no interior daqueles elementos estruturais [3, 13, 16, 20, 21].

A acção dos sais nos edifícios antigos é muito importante, pois as suas fundações e paredes maciças de grande espessura, construídas com materiais de construção porosos e hidrófilos, facilitam a ascensão de água por capilaridade a partir do solo, contribuindo para uma acumulação de sais. Como a maioria das paredes destes edifícios tem uma função estrutural, as consequências de deterioração devidas aos sais tornam-se mais gravosas [13].

Os sais solúveis originam problemas estéticos, diminuem as condições de habitabilidade, levam a custos elevados devidos às reparações e, por vezes, podem afectar a segurança estrutural dos edifícios [3, 16].

As principais causas de degradação dos materiais de construção, que podem afectar a durabilidade das argamassas, são os vários agentes ambientais e a presença de água associada à presença de sais solúveis [6, 13]. A acção destrutiva destes últimos é uma das causas de deterioração dos edifícios antigos e pode condicionar algumas soluções empregues na reabilitação (por exemplo, a utilização de uma nova argamassa ou calda de injeção liberta sais que depois migram para a superfície, quando em contacto com água). É um dos tipos de anomalias de correcção mais difícil, ou até inexequível, devido à impossibilidade física de remoção desses sais do interior dos materiais porosos onde existam [13, 18].

O processo de degradação dos materiais de construção pode ser agravado, dependendo da natureza dos materiais da alvenaria e da sua porosidade (isto é, da distribuição e da dimensão dos poros), das condições ambientais e do tipo de sal<sup>1)</sup>, e sua concentração no material poroso (função da solubilidade do sal, pois sais com solubilidades semelhantes podem produzir diferentes deteriorações) [6, 31].

As características dos materiais de construção, onde os fenómenos se desenvolvem, podem condicionar o grau de degradação. A absorção de água por capilaridade e a permeabilidade ao vapor de água condicionam a migração das soluções e da água (líquida ou na forma de vapor), enquanto que as suas resistências mecânicas condicionam a capacidade dos materiais resistirem às tensões criadas no interior dos poros. No entanto, existem também outros factores que condicionam o tipo de anomalias que podem ocorrer, como por exemplo as condições termo-higrométricas (temperatura e humidade relativa do ar ambiente), a radiação solar (condiciona a temperatura das paredes) e a velocidade e a direcção de circulação do ar (determinam a evaporação das soluções) [16].

As condições ambientais têm uma grande influência no comportamento de secagem de um material e, por sua vez, na taxa de cristalização dos sais. Apesar de ser necessária água no estado líquido para introduzir os sais no material poroso, assim que eles tiverem no seu interior, basta haver alterações da humidade relativa do ar para lhe induzir danos, pois tanto os fenómenos de cristalização como hidratação podem introduzir tensões internas nos materiais. Tem sido demonstrado que as rápidas mudanças de temperatura e humidade relativa do ar levam a uma maior deterioração do que se as mudanças das condições ambientais forem mais lentas, pois há uma maior frequência na repetição dos ciclos de cristalização/dissolução, o que provoca uma grande fadiga dos materiais (devido ao aumento de volume ou mudanças de forma que lhe introduzem tensões internas), levando assim à diminuição da sua capacidade resistente e, em consequência, à perda total de coesão [6, 13, 18].

---

<sup>1)</sup> Diferentes sais têm condições de cristalização e dissolução diferentes, por exemplo, uns só se dissolvem com teores de humidade muito superiores do que outros [6].

Como referido, os sais solúveis podem ter origem no solo, nos materiais de construção (ligantes, areias, tijolos), na acção atmosférica (ambientes marítimos), na poluição atmosférica ou na humidade ascendente por capilaridade a partir do terreno [3, 13, 16, 20].

Neste último caso, e como referido anteriormente, a água vai dissolvendo os sais solúveis, provenientes do solo, colocando-os em contacto com o reboco. Com condições de temperatura e humidade ambientes propícias, ocorre a evaporação da água e a deposição dos sais previamente dissolvidos [4]. Este fenómeno provoca uma progressiva colmatção dos poros e, consequentemente, uma redução da permeabilidade ao vapor de água dos materiais, o que dá origem a que o nível atingido pela ascensão capilar possa ainda aumentar [19].

Os sais depositados nas superfícies podem também propiciar a ocorrência de fenómenos de higroscopicidade, os quais persistem mesmo após terem sido resolvidos os problemas devidos à ascensão de água nas paredes [19].

A higroscopicidade dos sais solúveis está relacionada com a propriedade de absorverem humidade do ar, dissolvendo-se quando a humidade relativa do ar está acima de 65-75% e cristalizando com aumento de volume, quando a humidade relativa do ar baixa desses valores. O valor da humidade relativa para o qual se faz a transição entre as fases de dissolução e cristalização varia em função do tipo de sal, do seu grau de pureza e da possível combinação com outros tipos de sal, a qual faz baixar o nível de humidade relativa necessário para ocorrer a dissolução. Estes sais podem provocar o humedecimento das superfícies sobre as quais se encontrem. Podem também originar fenómenos de degradação (destacamento, desagregação e empolamento dos revestimentos e rebocos) devido à introdução de tensões nos poros dos materiais de construção resultantes do aumento de volume que acompanha a cristalização dos sais, em consequência de continuados ciclos dissolução-cristalização [13, 18, 19, 20, 21].

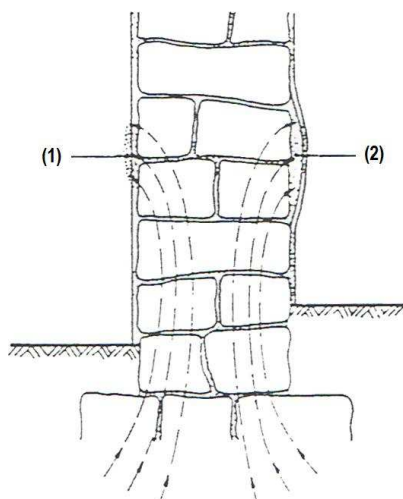
Como consequência da desagregação, as características mecânicas das alvenarias podem, nos casos mais graves, sofrer alterações (nomeadamente diminuição da resistência à compressão e ao corte) [4, 36].

Os sais solúveis presentes nos poros dos materiais de construção, quer no estado sólido (cristalizados) quer no estado líquido (em solução), não são considerados prejudiciais desde que se encontrem estáveis. A estabilidade dos sais depende do seu tipo e da estabilidade das condições de temperatura e, principalmente, humidade relativa em que se encontre o ambiente [13]. O que torna a situação gravosa é o humedecimento das paredes aliado às variações das condições ambientais, pois os sais dissolvidos acompanharão as migrações de água até às superfícies [19].

As construções que se mantêm secas (mesmo contendo sais no seu interior) não sofrem reacções internas que conduzam à sua deterioração [13].

Quando os sais são dissolvidos e transportados pela água, esta circula no interior dos materiais e os sais depositam-se nos seus poros, cristalizando quando a água evapora [20].

Se a cristalização se der à superfície do elemento construtivo, devido à quantidade de solução salina no interior de um material ser superior à taxa de evaporação dessa solução, os sais precipitam na forma de eflorescências. Porém, se a cristalização ocorrer entre o reboco e a alvenaria, acompanhada de um aumento de volume, devido à taxa de fornecimento de solução salina não ser mais rápida que a taxa de evaporação, os sais precipitam na forma de criptoflorescências, fig. 1.3 [4, 13, 16, 19, 36].



1 – Eflorescências (cristalização superficial de sais); 2 – Criptoflorescências (cristalização de sais abaixo da superfície)

Fig 1.3 – Representação esquemática da formação de eflorescências e criptoflorescências [19]

As eflorescências (cristalização superficial de sais) dão origem essencialmente a alterações superficiais e, no geral, não causam deterioração dos materiais mas afectam o seu aspecto estético, fig. 1.4. Podem ser removidas por escovagem ou lavagem húmida, não deixando grandes marcas nos paramentos [1, 13, 16].

As eflorescências são particularmente afectadas pela temperatura, humidade relativa e vento, sendo habitualmente um problema sazonal. Aparecem principalmente no Inverno quando se reúnem as seguintes condições: baixas taxas de evaporação da água, que permitem a migração dos sais para a superfície, e baixas temperaturas ambientes, que causam a condensação da água na superfície da argamassa [1].

As criptoflorescências (cristalização de sais abaixo da superfície) são responsáveis pela deterioração dos materiais, porque a cristalização dos sais origina um aumento do seu volume. A cristalização e a hidratação dos sais introduzem tensões internas nos materiais, quando ocorrem no interior dos seus poros. Os ciclos repetidos de cristalização/dissolução ou de hidratação/desidratação, por implicarem aumento de volume e mudanças de forma, causam fadiga dos materiais e conduzem à sua desagregação e consequente deterioração [13, 16], fig. 1.4.





1 – Eflorescências; 2 - Criptoflorescências

Fig. 1.4 – Anomalias provocadas pela acção dos sais

A fig. 1.5 mostra esquematicamente um exemplo de um edifício em Veneza, cujas fundações estão imersas em água e permanentemente expostas à ascensão capilar da água do mar e que em seguida se procedeu à sua secagem em dois ambientes diferentes: a situação A ocorreu em ambiente seco e sem vento, com deposição de sais cristalizados no paramento do revestimento; a situação B ocorreu num ambiente mais seco e muito ventoso, que acelerou a evaporação de água até mesmo dentro da parede para que se dê a deposição dos sais no interior do reboco com o destacamento do revestimento. Assim, na situação da fig. 1.5 A ocorreram eflorescências (pois a cristalização dos sais ocorreu à superfície) e na fig. 1.5 B ocorreram criptoflorescências (pois a cristalização dos sais ocorreu no interior da paredes) [9].

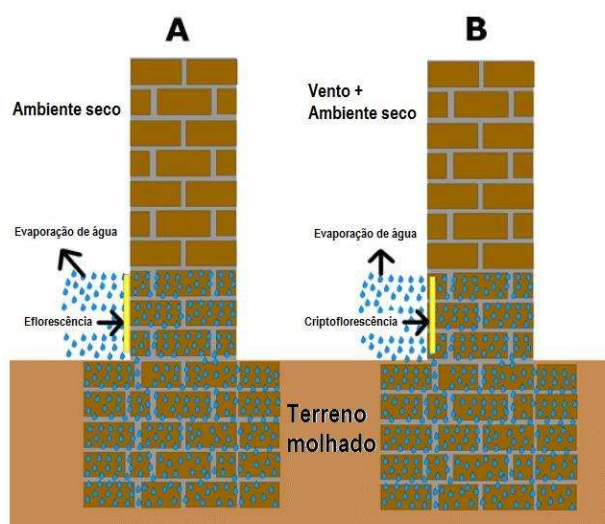


Fig. 1.5 – Representação esquemática de eflorescências e criptoflorescências em paredes de alvenaria imersas num terreno molhado e expostas à secagem [9]

Os sulfatos, os carbonatos, os cloretos, os nitritos e os nitratos são sais solúveis que se associam normalmente à ocorrência de manifestações patológicas. Destes sais, os três últimos são muito higroscópicos [19].

Embora o termo “sal solúvel” seja utilizado genericamente, são muito importantes as diferenças de comportamento entre os diversos sais. Cada sal tem o seu próprio comportamento, gerando taxas de degradação muito diferentes, quando testados em diferentes substratos. Dos muitos sais solúveis existentes nas alvenarias, os dois mais relevantes são o cloreto de sódio e o sulfato de sódio [6]. Neste sentido, faz-se nos dois pontos seguintes uma descrição sobre a acção destes sais solúveis, visto no presente trabalho experimental ser estudada a durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas na sua presença.

### **1.3.1 – Acção do cloreto de sódio**

A presença de cloretos está associada, em geral, à proximidade com ambientes marítimos ou à utilização de materiais em que esses sais se encontravam presentes (como é o caso do uso de areia de praia mal lavada) [18].

Nas zonas costeiras é comum a formação de eflorescências devido à presença do cloreto de sódio. Este sal, também denominado por halite, é muito solúvel e higroscópico e, quando se encontra em solução, tem muita mobilidade, penetrando nos materiais. Os seus ciclos de humedecimento/secagem permitem a dissolução e recristalização sucessivas, levando à degradação dos materiais de construção [13].

O ataque dos cloretos caracteriza-se por uma acção mecânica que ocorre aquando da formação e crescimento dos seus cristais no interior do material poroso (argamassa, por exemplo), induzindo tensões nas paredes dos poros que os envolvem, capazes de provocar desintegração do material [13].

Para uma argamassa ter um bom comportamento face aos cloretos tem de ter uma boa resistência mecânica ou uma elevada porometria<sup>2)</sup>, que permita os sais dissolverem e cristalizarem sucessivamente (originando variações de volume), sem se desenvolverem tensões internas na argamassa [13].

### **1.3.2 – Acção do sulfato de sódio**

Os sulfatos podem encontrar-se na forma de sulfato de sódio, sulfato de potássio, sulfato de magnésio e sulfato de cálcio, sendo todos solúveis [13].

O sulfato de sódio é um sal comum em muitos edifícios, sendo a sua acção bastante destrutiva. Vários autores defendem que é o sal mais destrutivo [13].

---

<sup>2)</sup> Define-se como porometria, a dimensão de um poro.

A capacidade destrutiva dos sulfatos é devida ao facto deste sal ser menos solúvel e móvel que outros sais (por exemplo, os cloretos) e produzir uma grande expansão quando hidratado [13]. Este sal precipita na forma hidratada e pode transformar-se em fase anidra. Quando em forma anidra, mesmo que a humidade relativa não seja muito alta, os sais não se dissolvem mas hidratam, causando uma destruição sempre elevada [13].

O sulfato de sódio pode cristalizar na forma deca-hidratada – mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) – ou na forma anidra – ternardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) – causando maior deterioração que um sal não hidratado, como é o caso do cloreto de sódio. A desidratação da mirabilite ocorre mais rapidamente que a hidratação da ternardite [13].

O ataque dos sais de sulfatos é uma acção mista de origem química e mecânica.

A acção química causa a formação de etringite e/ou taumasite quando os sulfatos, na presença de humidade, reagem com certos componentes da alvenaria (aluminatos ou silicatos de cálcio hidratados, presentes em ligantes hidráulicos como o cimento Portland, a cal hidráulica ou, eventualmente, resultantes da mistura de cal aérea com compostos pozolânicos) [13].

A etringite forma-se na presença de humidade, devido à reacção entre os sulfatos e os aluminatos de cálcio hidratados e origina expansão ou fendilhação da argamassa [13].

A taumasite resulta da reacção entre os sulfatos e os silicatos de cálcio hidratados na presença da água. A sua formação não é acompanhada por expansão significativa mas a argamassa perde coesão e resistência [13].

Tanto a formação da etringite como a da taumasite é macroscopicamente visível, através do empolamento do material original, que se pode fracturar quando a taumasite é produzida. Muitas vezes os dois compostos estão presentes, apesar de a etringite formar-se mais depressa que a taumasite e assim precedê-la [13].

A acção mecânica do sulfato de sódio ocorre da mesma forma que a acção mecânica do cloreto de sódio, isto é, dá-se aquando da formação e crescimento dos seus cristais no interior do material poroso, induzindo tensões nas paredes dos poros que os envolvem, capazes de provocar desintegração do material [13].

Para uma argamassa ter uma boa resistência aos sulfatos, os seus constituintes devem ter um baixo teor em silicatos e aluminatos (o que, por outro lado, confere menores resistências mecânicas) [13].

Em contrapartida, para que o seu comportamento face aos cloretos seja eficiente, é importante haver uma elevada resistência mecânica [13].

Para compatibilizar estes dois aspectos, a resistência mecânica pode ser substituída, com benefícios, por uma elevada porometria, que permite aos poros terem espaço para os sais terem ciclos de cristalização/dissolução sucessivos (com um consequente aumento de volume), sem desenvolvimento de tensões internas na argamassa [13].

Na secção 1.4 apresenta-se as principais técnicas de reabilitação estrutural de construções de alvenaria “ordinária”, passando, na secção 1.5, pela utilização de argamassas de substituição para a conservação dos edifícios antigos.

## **1.4 – Principais técnicas de reabilitação estrutural de construções de alvenaria “ordinária”**

Na reabilitação estrutural de construções de alvenaria “ordinária” devem-se ter em conta as seguintes condicionantes, que podem limitar as soluções a utilizar [35, 57]:

- respeitar as características específicas da solução construtiva, prevenindo o seu adequado comportamento face às acções mecânicas previstas;
- garantir a máxima compatibilidade mecânica, física e química possível entre os materiais existentes e os novos materiais;
- respeitar o princípio da reversibilidade ou, pelo menos, da reparabilidade, isto é, ser possível voltar ao início da intervenção, de modo a corrigir algumas opções da estratégia seguida, que demonstrem ter sido menos acertadas;
- realizar a mínima intervenção possível e no menor prazo de execução, de forma a minimizar o período de maior vulnerabilidade da construção.

Na escolha da solução de reabilitação estrutural a adoptar deve-se ter em conta que esta não deve conduzir ao aumento da massa global da construção [35].

As principais técnicas de reforço e consolidação estrutural a utilizar em construções de alvenaria de pedra, separadamente ou em conjunto, são as seguintes, sendo importante saber escolher a solução mais adequada para cada caso [4, 35, 43, 44]:

- **refechamento de juntas** consiste na remoção parcial da argamassa degradada numa profundidade de 5 a 7 cm, lavagem da junta com água a baixa pressão e substituição do material removido; a argamassa das juntas de um paramento só deve ser removida após a conclusão dos trabalhos do paramento oposto, para não ser prejudicada a estabilidade da parede; esta técnica simples tem em vista melhorar a protecção das faces das paredes e das condições de estanquidade à água, bem como as resistências mecânicas;

- **desmonte e reconstrução** consiste na substituição de elementos da alvenaria antiga que se mostrem insatisfatórios pelos materiais originais ou por materiais novos e argamassa; a argamassa a utilizar deve ser pouco retráctil e ter em vista uma melhor compatibilidade mecânica e física com a existente; esta técnica é eficaz e constitui uma vantagem para a manutenção das alvenarias antigas, melhorando a sua capacidade mecânica, corrigindo fendilhações ou melhorando a sua qualidade construtiva;
- **confinamento transversal** da alvenaria pode ser efectuado com elementos metálicos (varões roscados), designados por conectores (quando o comprimento dos varões é igual à espessura dos elementos estruturais a reforçar) ou pregagens (cujo comprimento é inferior à espessura dos elementos a reforçar); o efeito de confinamento da alvenaria é conseguido através das chapas de ancoragem fixas nas extremidades dos conectores e pregagens; os conectores e as pregagens são introduzidos em furos abertos para o efeito, perpendiculares ao plano das paredes (no caso dos conectores) ou inclinados (no caso das pregagens), e posteriormente selados com caldas de injeção adequadas; o confinamento pode ser mais generalizado e servir também para melhorar a ligação entre paredes ortogonais, sendo designado de “pregagens-costura”; em geral, esta solução é utilizada em conjunto com outras técnicas, tais como “rebocos armados”, injeção de caldas ou refechamento de juntas;
- **“reticolo cementato”** consiste no confinamento transversal realizado mediante a introdução de um conjunto reticulado de barras de aço, inclinadas, em furações feitas na alvenaria e posteriormente injectadas com caldas de cimento; esta técnica pode apresentar algumas dificuldades de execução relacionadas com a necessidade de realização de uma grande quantidade de furos inclinados (sempre difíceis de executar);
- **ligação entre paredes de fachadas paralelas**, através de varões metálicos ou do vigamento dos pavimentos, quando perpendicular às paredes a ligar, é uma boa forma de diminuição dos danos devidos a acções sísmicas (flexão das paredes) ou assentamentos diferenciais de fundações; estas ligações, denominadas por “armaduras passivas”, não devem introduzir tensões adicionais nos pontos de fixação à alvenaria, devendo ser ajustadas mas não tensionadas, uma vez que as tensões tenderiam a libertar-se durante uma acção sísmica ou assentamento diferencial de fundações, com um possível esmagamento local da alvenaria;
- **“rebocos armados”** destinam-se a paredes com acentuada degradação superficial; consistem na colocação de rede metálica de aço inox ou com protecção anticorrosiva ou de uma rede de fibra de vidro com protecção anti-alcalina (embora com menor desempenho estrutural), fixa à parede através de pequenas pregagens sobre a qual se aplicam as lâminas de argamassa ou

micro-betão; os “rebocos armados” devem ser ligados entre si por um conjunto de elementos (geralmente conectores metálicos) que solidarizem as lâminas de argamassa ou micro-betão entre si, de forma a evitar ou minimizar a desagregação da alvenaria, nomeadamente durante uma acção sísmica; em alguns casos, esta solução pode ter condicionantes estéticas ou arquitectónicas, uma vez que a espessura mínima requerida para as lâminas de micro-betão, da ordem dos 5 cm, pode sobrepor-se à saliência dos elementos de cantaria dos vãos, no exterior;

- **encamisamento** realizado em betão armado, é uma técnica semelhante aos “rebocos armados”, mas com lâminas de espessura superior (da ordem dos 8 a 10 cm), com maior capacidade resistente; destina-se a situações de elevada degradação estrutural mas apenas deve ser utilizada quando não existir outra alternativa de intervenção devido à forte intrusão que provoca;
- **sistemas porticados em betão armado** “pregados” às paredes de alvenaria: permitem que estas passem a desempenhar funções de “revestimento” ou forro; porém, esta técnica tem dificuldades de projecto, devidas às condições de ligação e ao funcionamento entre a estrutura de betão e a alvenaria, e dificuldades construtivas, devidas à necessidade de aberturas de rasgos na alvenaria para a execução da estrutura porticada;
- **“cinta sísmica”**: esta técnica proporciona uma grande melhoria no comportamento da parede em relação a forças perpendiculares ao plano, resultantes da acção sísmica; consiste na execução de uma viga de coroamento nas paredes resistentes do edifício;
- **aplicação de pré-esforço em elementos verticais da construção** é também uma técnica de reforço eficaz, que consiste na aplicação de varões metálicos traccionados, geralmente, nos cunhais; esta solução promove a melhoria da resistência mecânica e da ductilidade da alvenaria; previamente à aplicação do pré-esforço, devem ser seladas todas as fendas existentes na alvenaria para que a calda envolvente dos varões, aplicada em seguida, fique confinada às zonas dos varões;
- **injecção de caldas**: técnica destinada a paredes degradadas mas com capacidade para resistir à baixa pressão de injecção; tem como finalidades consolidar a alvenaria existente e promover a melhoria das condições de ligação entre os elementos, melhorando a sua integridade e coesão; as caldas de injecção devem ser pouco retrácteis e um pouco fluídas para preencherem os vazios e/ou fendas existentes; as caldas mais utilizadas resultam de combinações, em diversas proporções (nem sempre simultâneas), de cimento, cal hidráulica, cal aérea, pozolanas e água; o padrão da furação para as injecções corresponde, em geral, a cerca de dois a quatro furos por metro quadrado, distribuídos em quincôncio, que devem atingir

no mínimo meia espessura da parede, para assegurar a difusão uniforme da calda em toda a secção transversal; esta técnica é muitas vezes utilizada em conjunto com “rebocos armados” e confinamento transversal, sendo muito utilizada na reabilitação de paredes de alvenaria de pedra; as características e o tipo de dano da alvenaria determinam as propriedades da calda e o processo de injeção a utilizar, podendo dividir-se em injeções sob pressão, por gravidade ou por vácuo.

## **1.5 – Argamassas de substituição utilizadas na reabilitação estrutural de edifícios antigos**

A presente dissertação não aborda especificamente esta técnica de reabilitação, mas antes a utilização de uma argamassa que, sendo armada com fibra de vidro e aplicada sobre paredes de alvenaria de pedra previamente furadas e armadas (cosidas) transversalmente com fios de aço zincado, faz parte integrante de um sistema de reforço de paredes de alvenaria “ordinária”, nomeadamente face à acção sísmica, assentamento diferencial de fundações ou aumento das cargas gravíticas [35].

Por outro lado, considerando isoladamente esta argamassa, pode considerar-se que vai substituir a argamassa pré-existente, donde se justifica a apresentação da presente secção.

As argamassas têm variadíssimas utilizações e aplicações. Em paredes antigas de alvenaria “ordinária”, constituem uma elevada percentagem, aglutinando os elementos pétreos e servindo muitas vezes de revestimento. Em soluções de reforço deste tipo de paredes, as argamassas podem desempenhar também um papel fundamental.

As principais funções das argamassas de revestimento são a protecção das paredes contra a acção directa dos agentes climáticos, acções mecânicas de choque e erosão, acção química da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais, na água e no solo. O revestimento necessita de ter resistência mecânica suficiente, ser deformável (baixa rigidez), apresentar impermeabilidade suficiente e ter um bom comportamento aos sais para poder cumprir as funções referidas anteriormente [12].

Os revestimentos de paredes exteriores (armados ou não) são elementos muito sujeitos à degradação, porque estão mais em contacto com os agentes climáticos – especialmente o vento, que provoca desgaste e a água das chuvas, que provoca desagregações – razão pela qual são muitas vezes abrangidos nas intervenções [35, 56, 59]. A sua importância na imagem dos edifícios é determinante [59]. Desta forma, as exigências que as argamassas utilizadas na reabilitação de alvenarias de edifícios antigos devem cumprir e os cuidados com que são aplicadas servem para repor ou até melhorar a sua segurança estrutural, bem como assegurar e respeitar a estética, identidade cultural e o valor histórico dos edifícios [12]. Épocas e locais de construção distintos traduzem diferentes conhecimentos, hábitos sócio-culturais, métodos e materiais construtivos. Assim, os edifícios representam os materiais, as técnicas e os meios existentes na época e no local em que foram construídos. Quando se intervém

num edifício antigo, monumento ou não, há que ter estes aspectos em consideração, sob pena de se descaracterizar o edifício, perder a sua identidade, ou até comprometer a sua durabilidade [12, 56].

As acções de reabilitação realizadas nos edifícios antigos devem respeitar os materiais e os modelos de funcionamento originais pois, caso contrário, pode-se provocar um quadro patológico mais grave do que o que se pretende reparar, ou até originar uma degradação prematura das alvenarias que anteriormente se encontravam em “bom estado”. Assim, é importante manter os materiais e soluções originais, ou, quando é necessária a substituição parcial ou completa dos revestimentos antigos (por as anomalias serem consideradas graves – desagregação generalizada ou muitos destacamentos), substituí-los por outros compatíveis com o suporte e, se possível, com as características determinantes para o seu comportamento semelhantes às dos materiais e soluções pré-existentes [29, 59].

A escolha das argamassas de substituição (armadas ou não) deve satisfazer alguns critérios, tais como a determinação da composição aproximada e características físicas e mecânicas das argamassas pré-existentes, produção de uma argamassa de cal aérea com constituição semelhante à pré-existente e realização de ensaios, quer de laboratório, sobre provetes de argamassa, quer “in situ” sobre o revestimento aplicado em painéis experimentais para verificar os requisitos mínimos e a semelhança das principais características [29, 58].

Relativamente aos edifícios que se encontrem em ambiente marítimo (húmido, salino e agressivo), existem dificuldades em simular laboratorialmente essas condições, daí a importância da realização de ensaios experimentais, de modo a avaliar o comportamento “in situ” desses edifícios e, eventualmente, efectuar uma comparação com as argamassas antigas [29].

Assim, e em síntese, quando se pretende aplicar rebocos novos em paredes de edifícios antigos devem-se ter alguns cuidados, tais como [13, 21, 59]:

- ter um bom conhecimento da constituição e funcionamento dos revestimentos antigos e das alvenarias sobre as quais estão aplicados;
- escolher as argamassas mais adequadas, com características mecânicas, físicas e químicas compatíveis com as paredes antigas, para não introduzirem acções prejudiciais nestas;
- ter também uma boa capacidade de resistência face à acção dos sais solúveis, visto as paredes de edifícios antigos conterem geralmente elevados teores de sais.

Em relação a soluções de prevenção e/ou correcção disponíveis para as anomalias devidas à acção dos sais solúveis, estas são escassas, uma vez que a remoção dos sais é inviável em termos práticos e a anulação dos seus efeitos é difícil de ser alcançada. O recurso a argamassas especiais que na sua composição têm aditivos específicos e/ou determinadas misturas de ligantes e agregados, é uma das soluções existentes [19].



## 1.6 – Enquadramento do trabalho experimental desenvolvido

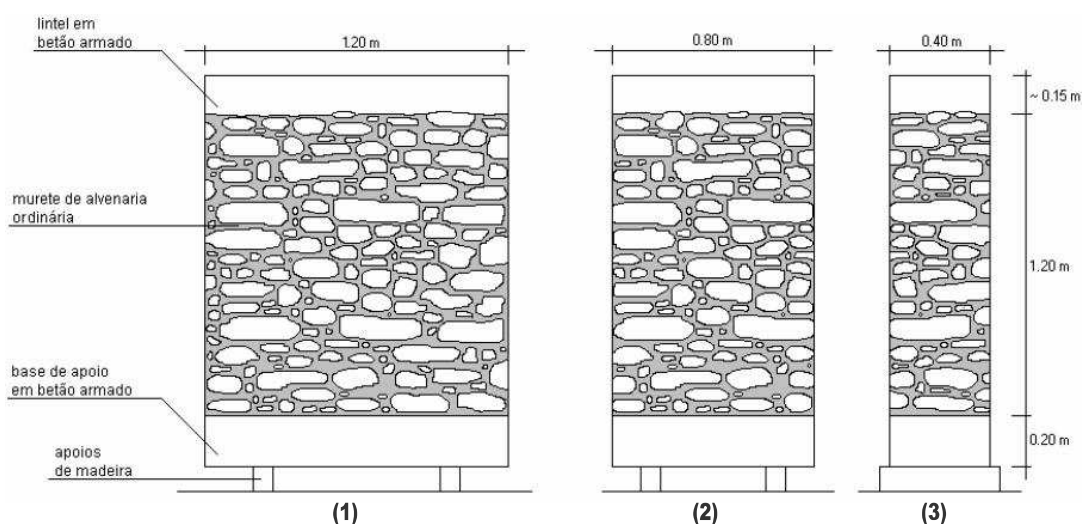
O trabalho apresentado vem na continuidade de um trabalho de investigação que foi realizado no DEC-FCT/UNL, entre 2002 e 2007, com o objectivo de compreender o comportamento mecânico de construções de alvenaria “ordinária”, antes e após o seu reforço, em que o reforço tinha o objectivo de prevenir ou reparar anomalias, como as resultantes da acção sísmica, assentamentos diferenciais de fundações ou a desagregação da alvenaria. Para isso foram aplicadas e estudadas quatro soluções de reforço em modelos experimentais de alvenaria “ordinária” (muretes) e procedeu-se à análise da durabilidade de alguns dos materiais utilizados. Os resultados obtidos foram comparados com outros provenientes de ensaio de muretes não reforçados (muretes de referência) [35].

Para este trabalho experimental foram construídos 62 modelos experimentais de alvenaria “ordinária”, assentes sobre bases individuais de betão armado com altura de 0,20 m.

Os muretes foram construídos com as seguintes dimensões: 42 modelos com 0,80mx1,20mx0,40m para ensaios de compressão axial, designados por “muretes pequenos” e 20 com 1,20mx1,20mx0,40m para ensaios de compressão-corte, designados por “muretes grandes”, figs. 1.6 e 1.7. Sobre os muretes foram construídos lintéis em betão armado com uma altura de 0,15 m e área igual à dos muretes, para distribuição das cargas verticais a aplicar e suporte dos vários equipamentos durante os ensaios mecânicos [35, 39].



Fig. 1.6 – Construção dos muretes de alvenaria “ordinária” utilizados no principal trabalho de referência desta dissertação [35]



1 – alçado do murete grande; b – alçado do murete pequeno; c – corte do murete grande e pequeno

Fig. 1.7 – Representação esquemática dos muretes grandes e pequenos [35]

A pedra utilizada nos muretes foi pedra calcária com máxima dimensão da ordem de  $D=25$  cm, assente com argamassa de cal aérea hidratada e areias de rio e de areeiro. A argamassa de assentamento foi produzida ao traço volumétrico de 1:3 (ligante : agregado), utilizando partes iguais de areia de rio e de areeiro e com um coeficiente água/ligante igual a 1,2. Foi utilizada uma proporção de 25% de argamassa de cal aérea e areia e 75% de pedra, por unidade de volume de alvenaria [35, 39].

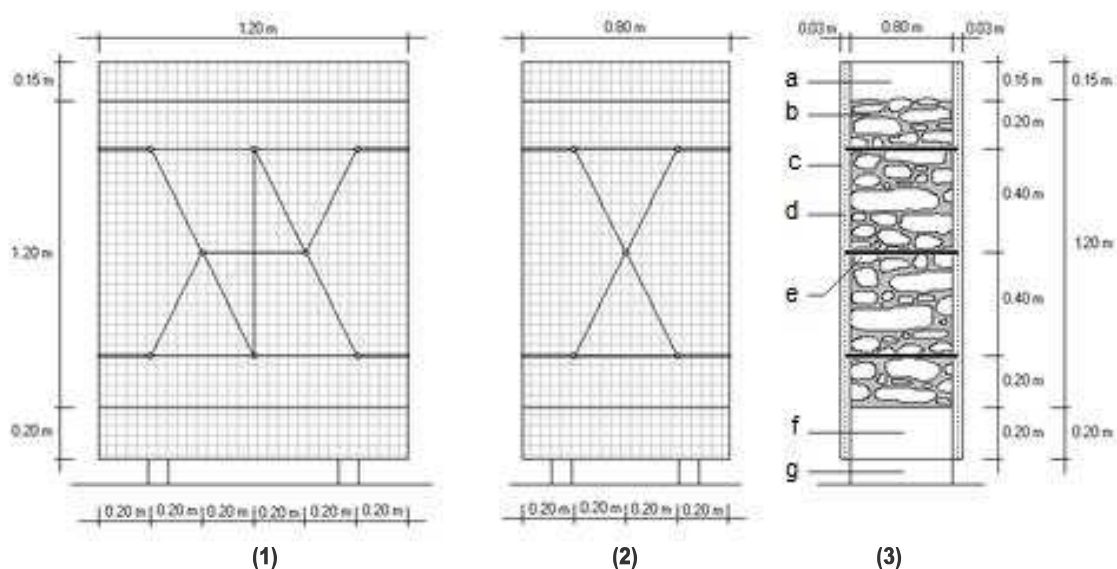
De seguida, apresentam-se as soluções de reforço estrutural a que os muretes foram sujeitos, com o objectivo de estudar e quantificar a eficiência de cada solução. As quatro soluções serão referidas sucintamente, dando apenas enfoque à solução IV, que é a que tem interesse no âmbito do presente trabalho [35]:

- **solução de reforço I:** consistiu em confinamento transversal simples por conectores metálicos transversais e chapas de ancoragem nas suas extremidades;
- **solução de reforço II:** baseou-se na utilização de lâminas de micro-betão armadas com malha de metal distendido numa ou em ambas as faces dos muretes, sem apoio na base e confinamento transversal por pregagem ou conectores metálicos;
- **solução de reforço III:** baseou-se na utilização de lâminas de micro-betão armadas com malha de metal distendido, com apoio na base e com e sem confinamento transversal;
- **solução de reforço IV:** baseou-se na utilização de reboco de argamassa bastarda, armado com rede de fibra de vidro, com apoio na base e confinamento transversal contínuo por fios de aço zincado.

A **solução de reforço IV** consistiu num reboco de argamassa bastarda com traço volumétrico 1:1:6 (cimento : cal aérea : areia, com 50% de areia do rio e 50% de areia de areeiro), com espessura média de 3 cm, aplicado manualmente em duas camadas com cerca de 1,5 cm cada, armado com rede dupla de fibra de vidro (com protecção anti-alkalina), com confinamento transversal por quatro fios contínuos de aço zincado com 4 mm de diâmetro, “cosendo” (costurando) a alvenaria, passando em cada furo quatro vezes, figs. 1.8 e 1.9 [35, 38].



Fig. 1.8 – Aspecto dos muretes da solução de reforço IV, antes do início da aplicação da segunda camada de argamassa [35]



1 – alçado do murete grande; 2 – alçado do murete pequeno; 3 – corte do murete grande e pequeno: a – lintel de betão armado; b – murete de alvenaria “ordinária”; c – reboco de argamassa bastarda ( $e \cong 3$  cm); d – malha de fibra de vidro (dupla); e – quatro fios de aço zincado, com  $\Phi=4$  mm, em cada furo transversal (confinamento transversal); f – base de apoio em betão armado; g – apoios de madeira ( $10 \times 7$  cm<sup>2</sup>)

Fig. 1.9 – Representação esquemática da caracterização da solução de reforço IV [35]

Esta configuração dos fios de aço correspondeu a uma área de 50,24 mm<sup>2</sup> (equivalente a um varão de 8 mm de diâmetro) em cada furo. Para efectuar o confinamento transversal da alvenaria, os fios de aço zincado saíam de um furo e entravam num dos furos mais próximos, de forma contínua (sem cortes), dando origem à “cosedura” da alvenaria. Os fios foram dobrados à saída de cada furo, em ângulos próximos de 90°, mas sem cantos vivos.

A malha dupla de fibra de vidro foi colocada nas faces dos muretes, sendo fixada com o sistema de cosedura da alvenaria, através da passagem dos quatro fios de aço zincado em cada furo. Na zona de entrada/saída dos fios de aço zincado, a malha foi reforçada com pequenos “painéis” de malha igualmente dupla. Depois de concluídos os trabalhos de colocação da rede e de passagem dos fios de aço zincado, os muretes ficaram prontos a receber a segunda aplicação da camada de reboco. Como o material foi aplicado manualmente, de forma análoga a um reboco tradicional, a última camada teve acabamento “à talocha”, ficando pronto a receber acabamento, fig. 1.10.

Por fim, para eliminar as folgas existentes entre as paredes dos furos, estes foram injectados com calda de cimento [35, 38].



Fig. 1.10 – Aspecto final dos muretes da solução de reforço IV [35]

O estudo da solução de reforço IV teve como objectivo responder ao problema da grande espessura requerida por soluções do tipo da II e III, em parte devida ao espaço ocupado pelo sistema de confinamento (extremidades dos varões roscados, porcas e chapas de ancoragem metálicas), e pelo respectivo recobrimento. A solução IV baseia-se no conceito de “reboco armado” e apresenta como principais características [35]:

- possibilidade de aplicação manual;
- sistema de confinamento transversal contínuo, que confere um incremento de resistência mecânica ao elemento a reforçar;

- espessura semelhante à dos rebocos interiores ou exteriores degradados (a substituir) da ordem dos 3 cm, porque o sistema de confinamento (fios de aço zincado) ocupa cerca de 4 a 5 mm;
- possibilidade de poder receber directamente a camada de acabamento (pintura ou outra).

## 1.7 – Motivação e objectivos

O presente trabalho teve como principal motivação conhecer, do ponto de vista experimental, o comportamento de argamassas face aos sais solúveis, nomeadamente, sulfatos e cloretos, numa das soluções de reforço estudadas anteriormente num trabalho de investigação realizado no DEC-FCT/UNL. Além disso, pretende-se analisar e comparar as características mecânicas, físicas e químicas determinadas para os vários tipos de argamassas estudadas e analisar aspectos de compatibilidade e durabilidade entre estas e os muretes de alvenaria “ordinária” construídos para o referido trabalho de investigação [35].

## 1.8 – Organização do trabalho

O trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, incluindo o presente, e dois anexos, divididos da seguinte forma:

No **Capítulo II**, sintetiza-se a pesquisa bibliográfica efectuada, como forma de comparar os resultados do trabalho experimental obtidos com outros trabalhos anteriormente realizados.

No **Capítulo III**, descreve-se o processo construtivo dos provetes de argamassa que se utilizaram para o presente trabalho experimental e os procedimentos de ensaio para a caracterização dos materiais e dos provetes de argamassa utilizados. Apresentam-se, ainda, os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais utilizados na sua execução, bem como dos ensaios de caracterização mecânica, física e química dos provetes. Após a apresentação de cada característica estudada na argamassa endurecida é feita uma análise aos resultados obtidos.

Por fim, enquadram-se e comparam-se os valores obtidos neste Capítulo com os obtidos por outros autores (Capítulo II).

No **Capítulo IV**, referem-se os procedimentos de ensaio para a caracterização quanto à resistência dos provetes de argamassa de cal aérea e bastardas à acção dos sais solúveis (cloretos e sulfatos) e

apresentam-se ainda os resultados obtidos em cada um dos ensaios efectuados. Após a apresentação dos resultados de durabilidade aos sulfatos é feita uma análise aos resultados obtidos.

No **Capítulo V**, resumem-se as principais conclusões obtidas com este estudo, confrontam-se os objectivos propostos com os objectivos alcançados e referem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

No **Anexo I**, apresentam-se os resultados obtidos em cada provete de argamassa ensaiado, relativamente aos ensaios realizados na caracterização mecânica, física e química referidos no Capítulo III.

No **Anexo II**, apresentam-se os resultados obtidos em cada provete de argamassa ensaiado, relativamente aos ensaios de caracterização face à resistência aos cloretos e sulfatos referidos no Capítulo IV.

Todas as figuras sem referência bibliográfica foram obtidas pela autora.



## **2.1 – Considerações iniciais**

Neste capítulo referem-se trabalhos de investigação sobre o comportamento de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis, bem como trabalhos cujo estudo incidiu em argamassas com as composições semelhantes às estudadas nesta dissertação.

Nesse sentido, a pesquisa bibliográfica realizada procura enquadrar o procedimento experimental adoptado neste trabalho e, em simultâneo, servir de referências aos valores obtidos na presente campanha experimental.

## **2.2 – Trabalhos de referência**

A presente dissertação tem como principal objectivo o estudo da durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face aos sais solúveis. Neste sentido, e como referido no Capítulo I, o principal trabalho de investigação que serviu de referência para este estudo foi realizado no DEC-FCT/UNL por F. Pinho e é intitulado “Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados” [35]. O trabalho consistiu, entre outras, na análise experimental de diversas soluções de reforço de paredes de alvenaria “ordinária”. Nesse estudo, a solução de reforço IV é a que tem maior relevância para este estudo, pois nela foi estudada a utilização de reboco de argamassa bastarda, armado com rede de fibra de vidro e confinamento transversal contínuo por fios de aço zincado.

Previamente ao estudo de cada solução de reforço foram construídos os muretes de referência constituídos por pedra calcária assente com argamassa de cal aérea hidratada da marca Lusical e areias de rio e de areeiro, produzida ao traço volumétrico de 1:3 (ligante : agregado), utilizando partes iguais de areia de rio e areeiro e com um coeficiente areia/ligante de 1,2. Foi utilizada uma proporção de 25% de argamassa de cal aérea e areia e 75% de pedra, por unidade de volume de alvenaria [35]. No início desta campanha experimental foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados na construção dos muretes de referência (areia, cal, argamassa e pedras), tendo em vista o conhecimento das suas características mecânicas, físicas e químicas. No caso da argamassa de assentamento, essa caracterização foi efectuada a partir de amostras obtidas diariamente de amassaduras aleatórias, tendo sido moldados mecanicamente vários provetes de várias dimensões, entre os quais provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm. Com esses provetes, que tiveram um processo de cura em ambiente seco, caracterizou-se a argamassa endurecida.

Para a caracterização da argamassa em pasta foram extraídas várias amostras, ao longo do tempo de construção dos muretes – 13 dias úteis – realizando-se o ensaio de espalhamento em cada uma (com um valor médio de 81%), fig. 2.1.

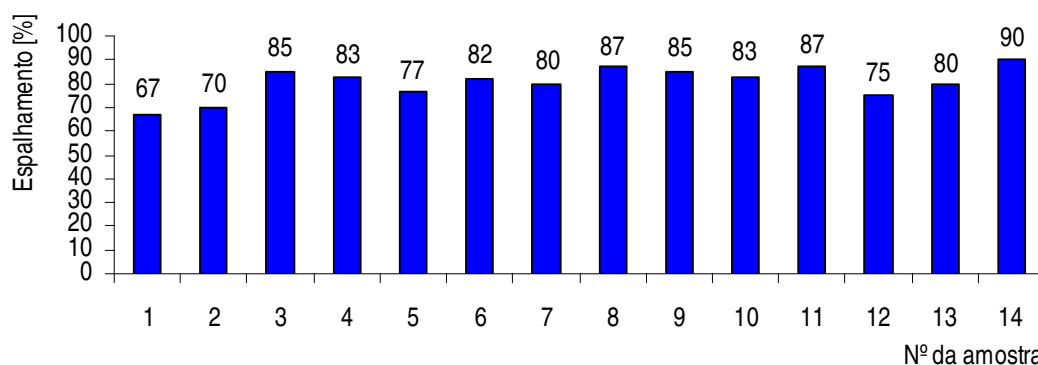


Fig. 2.1 – Resultados do ensaio de espalhamento da argamassa de cal aérea e areia [35]

Nas tabelas 2.1 e 2.2 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das areias e da argamassa endurecida, respectivamente. Estes resultados servem de comparação para os resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 2.1 – Resultados de ensaios de caracterização das areias [35]

Característica	Areia de rio	Areia de areeiro
Máxima dimensão do agregado, D [mm]	2,38	0,595
Mínima dimensão do agregado, d [mm]	0,149	0,149
Módulo de finura, Mf	2,7	1,8
Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	1584,4	1527,3

Tabela 2.2 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa de assentamento endurecida [35]

Característica			Idade [dias]	Argamassa de assentamento
Mecânica	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]		90	2310
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			0,300
	Resistência à compressão [MPa]			0,650
Física	Massa volúmica real [kg/m³]			2590,1
	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1742,9
	Porosidade aberta [%]			32,7
	Absorção de água por capilaridade	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]		17,4
		Valor assimpótico [kg/m²]		19,7
Química	Profundidade de carbonatação	[mm]	30	6,1
			90	14,6
		[%]	30	30,5
			90	73,0

Posteriormente à construção dos muretes de referência, foram aplicadas as soluções de reforço que se pretendiam estudar. A argamassa bastarda da solução de reforço IV, produzida ao traço volumétrico 1:1:3:3 (cimento : cal aérea : areia de rio : areia de areeiro), descrita na secção 1.6, foi aplicada em



duas camadas, com espessura média de 1,5 cm cada, com interposição de malha dupla de fibra de vidro e um sistema de cosedura (confinamento) com fio de aço zincado passando quatro vezes em cada um dos cinco ou oito furos transversais dos muretes pequenos e grandes, respectivamente [35].

Durante a preparação das duas camadas de reboco de argamassa bastarda, foram retiradas amostras dos materiais utilizados, para os diversos ensaios de caracterização.

Nas tabelas 2.3 e 2.4 apresentam-se, respectivamente, os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das areias utilizadas na argamassa bastarda e da argamassa endurecida utilizada na solução de reforço IV. Estes resultados servem de comparação para os resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 2.3 – Resultados de ensaios de caracterização das areias utilizadas na argamassa de reboco da solução de reforço IV [35]

Característica	Areia de rio	Areia de areeiro
Máxima dimensão do agregado, D [mm]	2,38	0,595
Mínima dimensão do agregado, d [mm]	0,149	0,149
Módulo de finura, Mf	2,6	1,8
Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	1541,7	1553,0

Tabela 2.4 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida utilizada na solução de reforço IV [35]

Característica			Idade [dias]	Argamassa bastarda
Mecânica	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]		146 a 154	5637
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			1,22
	Resistência à compressão [MPa]			4,55
Física	Massa volúmica real [kg/m³]		181 a 210	2768
	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1875
	Porosidade aberta [%]			32,2
	Absorção de água por capilaridade <sup>1)</sup>	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	115 a 116	13,6
		Valor assmptótico [kg/m²]		40,3

<sup>1)</sup> O ensaio decorreu com provetes inteiros, e não com metades como no caso da argamassa de assentamento

Outro trabalho de investigação desenvolvido no DEC-FCT/UNL, que serviu igualmente de referência a este trabalho, foi realizado por P. Faria [13], intitulado “Influência dos ligantes em argamassas de revestimento para alvenarias antigas”.

Para esse estudo foram moldados provetes de vários tipos de argamassa sobre os quais se procedeu à determinação das suas características. No entanto, para o presente trabalho apenas as seguintes argamassas estudadas serviram de referência:

- Argamassa de cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:3;
- Argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6;
- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6.

A areia utilizada foi areia de rio, a cal aérea hidratada da marca Lusical, a cal hidráulica da Secil Martingança e o cimento do tipo II e da classe 32,5 N<sup>3)</sup> da marca Secil.

No início desta campanha experimental [13] foi realizado o ensaio de análise granulométrica à areia de rio, obtendo-se uma máxima dimensão de 2,38 mm, mínima dimensão de 0,297 mm e um módulo de finura de 2,7. Foi também efectuado o ensaio de baridade a cada constituinte utilizado nas argamassas, cujos resultados médios obtidos apresentam-se na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Resultados do ensaio de baridade dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria [13]

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
Areia de rio	1590
Cal aérea	570
Cal hidráulica	1020
Cimento	1280

Os componentes das diferentes argamassas foram moldados mecanicamente em moldes de 16cmx4cmx4cm. Antes da moldagem dos provetes foi efectuado o ensaio de caracterização das argamassas em pasta (ensaio de espalhamento), cujos resultados foram de 74% para a argamassa de cal aérea e areia, de 73% para a argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia e de 67% para a argamassa de cimento, cal aérea e areia.

Posteriormente à cura dos provetes, em ambiente seco, com  $T=23\pm3^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=50\pm5\%$ , efectuou-se a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados se apresentam na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por P. Faria [13]

Característica			Idade [dias]	Argamassa		
				Cal aérea e areia	Cal hidráulica, cal aérea e areia	Cimento, cal aérea e areia
Mecânica	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		60	2300	1530	7340
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			0,33	0,13	1,23
	Resistência à compressão [MPa]			0,65	0,39	4,08
Física	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1720	1799	1841
	Porosidade aberta [%]			34	31	31
	Absorção de água por capilaridade	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]		22,2	19,8	15,0
		Valor assintótico [kg/m²]		18.1	20.1	20.9

<sup>3)</sup> A sua caracterização é feita no ponto 3.2.4.

Depois da caracterização dos provetes de argamassa endurecida, realizaram-se ensaios de resistência aos sais, nomeadamente cloretos e sulfatos. Todos os provetes de argamassa antes de serem submetidos ao ensaio de resistência aos sais, foram sujeitos ao ensaio de absorção de água por capilaridade. Esta acção tem de ser considerada por poder, eventualmente, levar à formação de bicarbonatos de cálcio, que se dissolvem na água, sendo por ela transportados e alterando a percentagem de ligante da argamassa e a sua consequente microestrutura interna [13].

Numa primeira fase ensaiaram-se provetes de argamassas diversificadas, entre as quais, as referidas anteriormente. Os resultados obtidos apresentam-se nas tabelas 2.7 e 2.8. Enquanto que no ensaio de resistência aos cloretos os provetes foram ensaiados aos 60 dias de idade, no ensaio de resistência aos sulfatos os provetes foram ensaiados aos 365 dias de idade.

Tabela 2.7 – Resultados de ensaios de resistência aos cloretos das argamassas estudadas por P. Faria [13]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos cloretos		
		Cloretos retidos [%]	Variação de massa [%]	
			Ciclo 30	Ciclo 50
Cal aérea e areia	1)	4,0	-12,3	-38,4
Cal aérea, cal hidráulica e areia		4,3	-24,3	-44,2
Cal aérea, cimento e areia		4,0	2,0	-1,5

1) Os ensaios decorreram aos 75 dias de idade (após a secagem até massa constante dos provetes que tinham sido submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade aos 60 dias de idade). Como a cura dos provetes só decorreu nas condições definidas até aos 60 dias de idade, considerou-se o ensaio como efectuado aos 60 dias [13]

Tabela 2.8 – Resultados de ensaios de resistência aos sulfatos das argamassas estudadas por P. Faria [13]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos sulfatos <sup>1)</sup>			
		Variação de massa [%]			
		Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Cal aérea e areia	365	-2,5	-48,2	-94,7	-100,0
Cal aérea, cal hidráulica e areia		-20,1	-71,1	-100,0	--
Cal aérea, cimento e areia		-5,3	-97,0	-100,0	--

1) O ensaio de resistência aos sulfatos decorreu com a utilização de solução saturada de sulfato de sódio

Numa segunda fase P. Faria ensaiou mais provetes de argamassas de cal aérea, tendo-os submetido a novo ensaio de resistência aos sulfatos. Este ensaio foi realizado em duas condições. Na primeira, o ensaio desenvolveu-se com a imersão dos provetes (com 60 dias e também com cerca de um ano de idade) numa solução saturada de sulfato de sódio, obtendo-se os resultados apresentados na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Resultados de ensaios de resistência aos sulfatos das argamassas estudadas por P. Faria [13]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos sulfatos <sup>1)</sup>			
		Variação de massa [%]			
		Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Cal aérea e areia	60	5,0	-20,0	-89,4	-100,0
Cal aérea e areia	365	-10,1	-76,4	-100,0	--

<sup>1)</sup> O ensaio de resistência aos sulfatos decorreu com a utilização de solução saturada de sulfato de sódio

Na segunda condição, procedeu-se à realização do mesmo ensaio mas fazendo a imersão dos provetes (com 60 dias de idade) numa solução de 14% de sulfato de sódio deca-hidratado (que corresponde a 6% de sulfato de sódio anidro). Observou-se que a variação de massa dos provetes no 5º ciclo foi de -2,5% e no 9º ciclo de -100%.

O trabalho de investigação realizado V. Rato intitulado “Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas” [41] teve como objectivo avaliar a relação entre a granulometria das areias e os tipos de ligantes utilizados nas argamassas, as propriedades da sua microestrutura e o seu comportamento. Para isso foram preparadas várias composições de argamassas que incluíram quatro tipos de ligante (cal aérea, cal hidráulica, cimento branco e um ligante misto composto por cal aérea e cimento Portland corrente) e dezasseis areias de granulometria diferente.

Para este trabalho apenas serviram de referência as seguintes composições de argamassa:

- Argamassa de cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:3;
- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6.

A cal aérea hidratada em pó utilizada foi da marca Lusical e o cimento Portland CEM II/B-L 32,5 N da marca Secil. As areias utilizadas nestas formulações foram de seis tipos, pois a influência da sua granulometria era um dos parâmetros que se queria avaliar no comportamento das argamassas. Apesar de não se encontrar neste trabalho de investigação uma areia com máxima e mínima dimensão semelhantes às obtidas na presente campanha experimental, decidiu-se considerar, como referência, a areia cuja máxima dimensão fosse a mais próxima da areia de rio aqui utilizada (uma vez que a máxima dimensão é o parâmetro que condiciona muitas vezes os cálculos de composição de argamassas e betões). Assim, os valores obtidos na análise granulométrica da areia considerada como referência para este trabalho foram de 2,36 mm e 0,500 mm para a máxima e mínima dimensão do agregado, respectivamente.

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas mecanicamente em moldes de 16cmx4cmx4cm. Antes da moldagem dos provetes foi efectuado o ensaio de caracterização das

argamassas em pasta (ensaio de espalhamento), cujos resultados foram de 65% para as argamassas de cal aérea e areia e de 70% para as argamassas de cimento, cal aérea e areia.

Posteriormente à cura dos provetes, em ambiente seco, com  $T=23\pm 3^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=50\pm 5\%$ , efectuou-se a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 2.10.

Estes resultados servem de comparação para os resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 2.10 – Resultados de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas estudadas por V. Rato [41]

Característica			Idade [dias]	Argamassa	
				Cal aérea e areia	Cimento, cal aérea e areia
Mecânica	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		60	1793	5905
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			0,23	0,96
	Resistência à compressão [MPa]			0,48	3,02
Física	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1705	1801
	Porosidade aberta [%]			34	30
	Absorção de água por capilaridade <sup>1)</sup>	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]		18,36	21,78
		Valor assíptótico [kg/m²]		18,610	22,577

<sup>1)</sup> O ensaio decorreu com provetes inteiros

O trabalho de investigação realizado por F. Henriques e V. Rato intitulado “Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade” [20] também serviu de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo. Nesse trabalho de investigação recorreu-se a uma campanha experimental para avaliar o comportamento de alguns produtos disponíveis no mercado, destinados a optimizarem o comportamento de argamassas face aos fenómenos de higroscopicidade dos sais, utilizando como referência duas composições de argamassas comuns de características conhecidas:

- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6;
- Argamassa de cimento e areia com o traço volumétrico 1:4.

Em todas as composições foi usada areia de rio, com baridade de 1480 kg/m<sup>3</sup>.

Para este trabalho apenas interessa considerar os resultados obtidos na argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia, pois é uma das que foi estudada na presente dissertação.

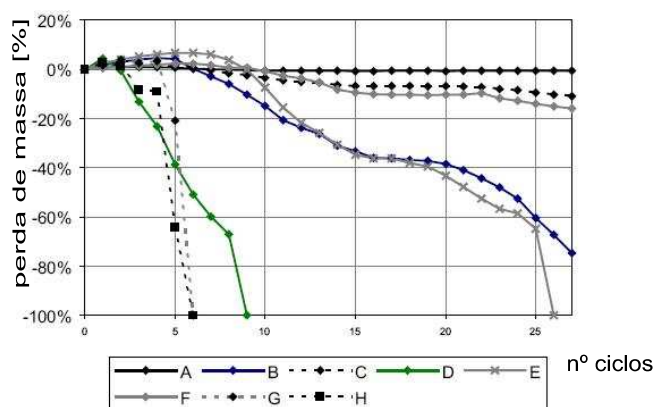
As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas mecanicamente em moldes de 16cmx4cmx4cm. A quantidade de água utilizada na amassadura das argamassas foi doseada de forma a obter um valor de espalhamento da ordem dos 65-70% [20].

Posteriormente à cura dos provetes, em ambiente seco com  $T=20^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=60\%$ , foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas e ensaios de resistência aos sulfatos (que decorreram

com a utilização de solução saturada de sulfato de sódio). Na tabela 2.11 e na fig. 2.1 apresentam-se os resultados obtidos, respectivamente.

Tabela 2.11 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida estudada por F. Henriques e V. Rato [20]

Característica			Argamassa
			Cimento, cal aérea e areia
Mecânica	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		5600
	Resistência à tracção por flexão [MPa]		1,06
	Resistência à compressão [MPa]		3,79
Física	Massa volúmica real [kg/m³]		2615
	Massa volúmica aparente [kg/m³]		1843
	Porosidade aberta [%]		29,5
	Absorção de água por capilaridade	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	15,78
		Valor assíptótico [kg/m²]	18.802



1) A argamassa de cimento, cal aérea e areia é representada pela linha H

Fig. 2.2 – Resultados do ensaio de resistência aos sulfatos das argamassas estudadas por F. Henriques e V. Rato [20] em termos de perda de massa

O trabalho de investigação realizado por C. Guerreiro *et al* intitulado “Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos” [17] também serviu de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo. A análise foi efectuada recorrendo ao estudo das características mais importantes para a avaliação do desempenho de argamassas para rebocos de edifícios antigos, nomeadamente o seu comportamento face a acção dos sais solúveis, tendo também em consideração a idade na evolução das características das argamassas testadas. Para isso, foram moldados provetes de vários tipos de argamassas, entre as quais uma que serviu de referência ao presente trabalho:

- Argamassa de cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:3.

A areia utilizada foi areia de rio e a cal aérea hidratada em pó foi de fabrico nacional.

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas mecanicamente em moldes de 16cmx4cmx4cm. Antes da moldagem dos provetes foi efectuado o ensaio de espalhamento, cujos valores obtidos foram entre 65% e 69%.

Posteriormente à cura dos provetes, em ambiente seco com  $T=20\pm2^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=60\pm5\%$ , foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas e ensaios de resistência aos sais, nomeadamente aos cloretos e sulfatos, aos 60 e 120 dias de idade.

Pelas razões referidas anteriormente, é importante indicar que todos os provetes de argamassa antes de serem submetidos ao ensaio de resistência aos sais, foram sujeitos ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

Nas tabelas 2.12 a 2.15 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 2.12 – Resultados de ensaios de caracterização aos 60 dias de idade da argamassa endurecida estudada por C. Guerreiro *et al* [17]

Característica			Idade [dias]	Argamassa Cal aérea e areia
Mecânica	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		60	2350
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			0,28
	Resistência à compressão [MPa]			0,69
Física	Massa volúmica real [kg/m³]			2604
	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1724
	Porosidade aberta [%]			33,8
	Absorção de água por capilaridade	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]		17,22
		Valor assimpótico [kg/m²]		17,98

Tabela 2.13 – Resultados de ensaios de resistência aos sais aos 60 dias de idade da argamassa estudada por C. Guerreiro *et al* [17]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos cloretos				Resistência aos sulfatos <sup>1)</sup>		
		Cloretos retidos [%]	Variação de massa [%]			Variação de massa [%]		
			Ciclo 30	Ciclo 50	Ciclo 63	Ciclo 5	Ciclo 15	Ciclo 25
Cal aérea e areia	60	3,51	-34,23	-77,70	--	1,96	-0,70	-31,39

<sup>1)</sup> O ensaio de resistência aos sulfatos decorreu com a utilização de solução a 6% de sulfato de sódio

Tabela 2.14 – Resultados de ensaios de caracterização aos 120 dias de idade da argamassa endurecida estudada por C. Guerreiro *et al* [17]

Característica			Idade [dias]	Argamassa Cal aérea e areia
Mecânica	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		120	2230
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			0,24
	Resistência à compressão [MPa]			0,69
Física	Massa volúmica real [kg/m³]			2064
	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1761
	Porosidade aberta [%]			32,4
	Absorção de água por capilaridade	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]		15,3
		Valor assíptótico [kg/m²]		17,37

Tabela 2.15 – Resultados de ensaios de resistência aos sais aos 120 dias de idade da argamassa estudada por C. Guerreiro *et al* [17]

Argamassa	Idade [dias]	Resistência aos cloretos				Resistência aos sulfatos <sup>1)</sup>		
		Cloretos retidos [%]	Variação de massa [%]			Variação de massa [%]		
			Ciclo 30	Ciclo 50	Ciclo 63	Ciclo 5	Ciclo 15	Ciclo 25
Cal aérea e areia	120	3,28	5,74	-32,83	-66,84 <sup>2)</sup>	2,04	-4,06	-25,38

<sup>1)</sup> O ensaio de resistência aos sulfatos decorreu com a utilização de solução a 6% de sulfato de sódio

<sup>2)</sup> “Equivalente” ao ciclo 50, por ter ocorrido uma anomalia no funcionamento da câmara climática [17]

O trabalho de investigação realizado por T. Pereira intitulado “Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas” [33] também serviu de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo. Nesse trabalho de investigação realizou-se um desenvolvimento experimental com argamassas que resultaram da combinação de três tipos de ligante, três tipos de areia, duas quantidades de água e ainda um introdutor de ar. O número de combinações que foi possível efectuar com estes materiais deram origem a várias argamassas diferentes.

Para este trabalho apenas serviu de referência a seguinte composição de argamassa:

- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com o traço volumétrico 1:1:6.

Nesta formulação usou-se areia de rio, cal aérea hidratada em pó e cimento CEM II/B-L 32,5 N da Secil. Para esta argamassa realizaram-se duas amassaduras distintas, baseando-se essa distinção na quantidade de água suficiente para obter um valor no ensaio de espalhamento de 55% e outro de 75%. No entanto, para o presente estudo apenas interessa considerar a argamassa cujo espalhamento obtido foi de 75%, por ser o valor mais próximo do obtido na presente campanha experimental.



No início desta campanha experimental [33] foram realizados ensaios de baridade a cada constituinte utilizado nas argamassas, cujos resultados médios obtidos foram de 1445 kg/m<sup>3</sup> para a areia de rio, 361 kg/m<sup>3</sup> para a cal aérea e 1045 kg/m<sup>3</sup> para o cimento.

Os componentes das diferentes argamassas foram misturados e compactados mecanicamente em moldes de 16cmx4cmx4cm. Antes da moldagem dos provetes foi efectuado o ensaio de caracterização das argamassas em pasta (ensaio de espalhamento), cujo resultado obtido para a argamassa de cimento, cal aérea e areia foi de 75%.

Posteriormente à cura dos provetes, em ambiente seco, com  $T=20\pm2^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=65\pm5\%$ , efectuou-se a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 2.16.

Estes resultados servem de comparação para os resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 2.16 – Resultados de ensaios de caracterização da argamassa estudada por T. Pereira [33]

Característica			Idade [dias]	Argamassa
				Cimento, cal aérea e areia
Mecânica	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		62	4935
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			1,05
	Resistência à compressão [MPa]			4,89
Física	Massa volúmica aparente [kg/m³]			1827
	Porosidade aberta [%]			30
	Absorção de água por capilaridade <sup>1)</sup>	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]		18,0
		Valor assíptótico [kg/m²]		38,264

<sup>1)</sup> O ensaio decorreu com provetes inteiros

O trabalho de investigação realizado por R. Veiga *et al* intitulado “Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos” [57] também serviu de comparação aos resultados obtidos no presente trabalho. Nesse trabalho foi feita uma campanha experimental onde foram estudadas algumas argamassas usadas correntemente em revestimentos de substituição, entre as quais:

- Argamassa de cal aérea e areia com traço volumétrico de 1:3;
- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia com traço volumétrico de 1:1:6.

Na tabela 2.17 apresentam-se os resultados obtidos na caracterização das argamassas de substituição ensaiadas em laboratório.

Tabela 2.17 – Resultados de ensaios de caracterização de argamassas de substituição ensaiadas em laboratório [57]

Características			Idade [dias]	Argamassas	
				Cal aérea e areia	Cal aérea, cimento e areia
Mecânicas	Módulo elasticidade dinâmico [MPa]		90	4400	4770
	Resistência à tracção por flexão [MPa]			0,4	0,8
	Resistência à compressão [MPa]			1,0	2,9
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]			1900	1870
	Absorção de água por capilaridade	Coef. de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]		19,2	14,2

Outro trabalho de investigação foi realizado por T. Gonçalves e é intitulado “Salt crystallization in plastered or rendered walls” [15]. Este trabalho teve como objectivo analisar o comportamento de rebocos aplicados em paredes contaminadas com sais solúveis. Para isso foram avaliadas duas técnicas laboratoriais para controlo da humidade relativa por meio de soluções salinas e para avaliação do teor de sal com base na medição do teor de humidade higroscópica. Foi também investigada a secagem de materiais contaminados com sais através de ensaios de secagem monitorizados por ressonância magnética nuclear, o que permitiu entender melhor a influência de sais solúveis na secagem de materiais porosos.

Quanto ao comportamento de rebocos relativamente à cristalização de sais, este foi estudado por meio de ensaios de cristalização.

Neste estudo foi tido em conta a interacção revestimento/suporte, procurando avaliar o efeito dos sais solúveis, não apenas no revestimento mas também nos materiais de suporte que estes devem proteger, visto que os rebocos têm um papel fundamental como camada de sacrifício nos edifícios antigos, isto é, visam proteger a alvenaria das acções destrutivas, como por exemplo, a cristalização dos sais.

Com o objectivo de avaliar essa interacção, foi desenvolvido neste estudo um novo ensaio de cristalização específico para revestimentos. O ensaio baseou-se na utilização de provetes compostos de revestimento/suporte, procedendo-se a uma avaliação global deste sistema. Foi introduzida uma quantidade pré-determinada de solução salina no suporte, por imersão parcial dos provetes, permitindo estudar o comportamento de cada tipo de argamassa aplicada, uma vez que se simula a aplicação destas argamassas sobre suportes identicamente contaminados. O método admitiu a utilização dos materiais de suporte que fossem considerados mais relevantes, uma vez que o mesmo tipo de argamassas pode ter um comportamento diferente quando aplicada sobre suportes diferentes.

Na campanha experimental foram utilizadas várias argamassas tradicionais e industriais, todas aplicadas sobre o mesmo tipo de suporte. Foram utilizadas soluções a 10% de cloreto de sódio e de sulfato de sódio, bem como apenas água destilada. Os provetes que foram utilizados tinham

dimensões de 5cmx5cmx5cm compostos por rebocos aplicados num substrato de tijolo. Os provetes foram parcialmente imersos em solução durante 5 minutos, com uma superfície líquida de cerca de 5 mm acima da sua face inferior. Posteriormente, foram submetidos a vários ciclos de contaminação/secagem, sendo a fase de secagem efectuada em ambiente condicionado com ciclos diários de variação das condições ambientes: 16 horas com  $T=40^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=15\%$  e 8 horas com  $T=20^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=50\%$ . Por fim, as amostras foram pesadas e avaliadas semanalmente. Os ciclos de humedecimento/secagem terminavam quando, pelo menos, 80% da solução que os provetes continham com a fase de contaminação tivesse evaporado.

Não se apresentam os resultados obtidos neste trabalho, pois este não é apresentado para comparação de resultados com a presente dissertação, mas com o objectivo de mostrar outra abordagem na análise de durabilidade aos cloretos, com base em provetes com características geométricas diferentes das utilizadas na presente dissertação.



# CAPÍTULO III

## CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA. ENQUADRAMENTO DOS RESULTADOS

### 3.1 – Considerações iniciais

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos de ensaio e os resultados da caracterização mecânica, física e química dos provetes e dos materiais utilizados na preparação das argamassas em estudo na presente dissertação. Após a apresentação de cada característica estudada na argamassa endurecida é efectuada uma análise aos resultados obtidos.

Toda a campanha experimental, excepto o ensaio de determinação de duas das características mecânicas (resistência à tracção por flexão e resistência à compressão) decorreu nos laboratórios de materiais de construção do DEC-FCT/UNL.

Por fim, enquadram-se e comparam-se os valores obtidos neste Capítulo com os obtidos por outros autores (Capítulo II), com o objectivo de os poder extrapolar ao trabalho de investigação [35] que serviu de referência ao presente trabalho.

### 3.2 – Tipos de provetes e materiais utilizados na preparação das argamassas

Para este trabalho foram moldados provetes de argamassa com três constituições diferentes: cal aérea e areia (CA); cal hidráulica, cal aérea e areia (CH)<sup>4)</sup>; cimento, cal aérea e areia (CI).

Nas três argamassas foram utilizadas areias de duas origens: rio e areeiro.

Na secção 3.4 são referidas as composições volumétricas dos provetes.

Nos pontos seguintes identificam-se os materiais utilizados na amassadura das argamassas.

#### 3.2.1 – Areias de rio e de areeiro

As areias utilizadas na amassadura dos provetes vieram de Lisboa, no caso da areia de rio, e da zona de Rio Maior, no caso da areia de areeiro, fig. 3.1.

---

<sup>4)</sup> Na presente dissertação foi considerada uma composição de argamassa diferente da utilizada no principal trabalho de referência [35] (argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia), pois pretendeu-se alargar um pouco mais o âmbito de caracterização de argamassas face aos saís.



Fig. 3.1 – Areias de rio e de areeiro utilizadas na amassadura das argamassas

As areias são agregados finos que, quando unidos por um ou mais ligantes, constituem as argamassas. Nas argamassas utilizam-se genericamente areias com máxima dimensão<sup>5)</sup> inferior a 4,76 mm – peneiro nº4 da norma ASTM [13]. Do ponto de vista granulométrico, a dimensão de uma partícula é definida pela abertura de uma malha (quadrada ou circular) através da qual ela passa, ficando retida numa malha de forma idêntica, mas de menor abertura [11].

Do ponto de vista mineralógico, as areias podem ser siliciosas, provenientes de rio ou de areeiro, ou calcárias, provenientes da britagem do material extraído das pedreiras de rochas calcárias. No primeiro caso classificam-se de areias naturais e, no segundo caso, de areias artificiais.

As areias, podem conter uma maior ou menor percentagem de argila. As areias de areeiro podem conter algum desse teor de argila. A areia de areeiro pode aumentar a trabalhabilidade e as resistências mecânicas às argamassas devido aos finos da argila, mas a sua utilização pode reduzir a ligação entre o ligante e a areia e aumentar a retracção, levando a fenómenos de fissuração.

A areia de areeiro apresenta grãos mais angulosos enquanto a areia de rio apresenta grãos mais rolados, por isso, esta última confere uma menor resistência e trabalhabilidade às argamassas.

O tipo de areia utilizado e a sua composição granulométrica têm grande influência no comportamento das argamassas, porque uma granulometria adequada e uma grande quantidade de partículas angulosas, contribui para uma maior compacidade – porque a percentagem de vazios será menor e, consequentemente, reduz-se a dosagem de ligante necessário. Assim, a escolha da areia e sua proporção na mistura têm um papel importante na qualidade e no desempenho final das argamassas [2, 13].

### **3.2.2 – Cal aérea**

Na amassadura dos provetes de argamassa de cal aérea e de argamassa bastarda de cimento e cal aérea foi utilizada cal aérea hidratada em pó da marca Lusical, fig. 3.2.

<sup>5)</sup> Conceito definido mais à frente, no ponto 3.3.1



Fig. 3.2 – Cal aérea hidratada utilizada na amassadura das argamassas

A cal aérea é um ligante que resulta da decomposição, pela acção da temperatura, de uma rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio, ou de cálcio e magnésio. O produto obtido pela cozedura destes calcários, a 894°C, designa-se por óxido de cálcio (mais conhecido por “cal viva”), sendo obtido com uma libertação de dióxido de carbono, segundo a seguinte reacção química (calcinação) [11]:

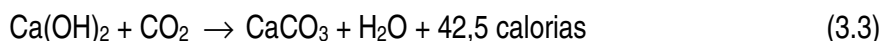


Antes de se poder aplicar a cal viva, procede-se à sua extinção por imersão ou aspersão com água, através de uma reacção química exotérmica e expansiva (hidratação) que transforma o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio, também conhecido por “cal apagada”, cal hidratada ou cal [11]:



A extinção da cal dá-se com uma forte libertação de calor, que pode conduzir a temperaturas superiores a 100°C. Quando a extinção se faz por imersão, obtém-se uma pasta que se pode conservar ao longo do tempo, sem carbonatar (endurecer), podendo ser utilizada em argamassas.

Após a sua aplicação, em caiação ou como constituinte de argamassas, dá-se a carbonatação por combinação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono da atmosfera, através da seguinte reacção química (carbonatação) [11]:



O carbonato de cálcio que se forma é similar ao material de partida, do ponto de vista químico, mas apresenta propriedades que a rocha original não possuía [11, 57].

As argamassas de cal aérea e areia possuem baixas resistência mecânica, rigidez (baixo módulo de elasticidade) e aderência ao suporte; no entanto têm menor tendência de fendilhação. Apresentam a

vantagem e a característica particular de, depois das argamassas serem aplicadas sobre um suporte e retraírem, poderem ser reapertadas contra este, fechando as fendas desenvolvidas por retracção inicial e aumentando a compactação das argamassas [14].

Neste tipo de argamassas a água não é necessária para a hidratação do ligante (ao contrário do que acontece no caso das argamassas com ligantes hidráulicos ou parcialmente hidráulicos).

### 3.2.3 – Cal hidráulica

Na amassadura dos provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, utilizados no presente trabalho, foi utilizada cal hidráulica da marca Secil Martingança, fig. 3.3.

A cal hidráulica produzida pela Secil Martingança, classificada na classe de resistência superior NHL5<sup>6)</sup>, segundo a norma NP EN 459-1:2002 [22], é uma cal hidráulica natural, constituída maioritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio e é obtida pela cozedura de calcário argiloso (marga), seguida de moagem e adição de sulfato de cálcio para regularização da presa [64].



Fig. 3.3 – Cal hidráulica utilizada na amassadura das argamassas

A estrutura da cal hidráulica natural é diferente da estrutura das cals aéreas, uma vez que é obtida de rochas constituídas por uma mistura de argila e calcário (marga) e não apenas de calcário [45].

Quando o calcário que se sujeita à acção da temperatura (mais elevada do que a utilizada no fabrico da cal aérea) tem quantidades de argila compreendidas entre 5% e 20%, além da formação do óxido de cálcio, há a combinação da sílica e da alumina com este, em quantidades significativas, resultando daí a presença de silicatos e aluminatos de cálcio [8, 11].

A hidratação dos silicatos e dos aluminatos de cálcio dá origem à cal hidráulica, que é um produto que endurece tanto em contacto com a água como com o ar. Neste produto, uma parte da cal está livre,

<sup>6)</sup> Segundo a norma NP EN 459-1:2002 [22], as cals hidráulicas naturais, denominadas por NHL, são produzidas por calcinação com redução a pó por extinção, com ou sem moagem. Todas as NHL têm a propriedade de fazer presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico contribui para o processo de endurecimento. O valor 5 seguido das siglas indica a classe de resistência à compressão, que pode variar entre 5 e 15 MPa aos 28 dias e, ser maior ou igual a 2 MPa aos 7 dias.



hidratando-se, com expansão, e endurecendo após a amassadura com água e contacto com o dióxido de carbono do ar, por carbonatação [8, 11].

A cozedura da cal hidráulica é realizada em fornos, onde ocorrem as seguintes fases [8, 11]:

- evaporação da água de embebição da pedreira, com uma temperatura entre 105 e 110°C (5 a 10% da massa);
- desidratação das margas, com uma temperatura entre 500 e 700°C;
- decomposição do calcário, com uma temperatura entre 850 e 900°C;
- reacção da sílica e da alumina da argila com o óxido de cálcio, com uma temperatura (ligeiramente inferior à utilizada nos cimentos) entre 1000 e 1500°C, originando silicatos e aluminatos de cálcio.

A cal retirada do forno deve ser extinta, não só com o objectivo de eliminar a cal viva (equação 3.2), mas também para provocar a pulverização de toda a cal hidráulica.

A extinção deve ser feita com precaução, devendo-se apenas adicionar a quantidade de água necessária para hidratar a cal viva, uma vez que os silicatos e aluminatos também reagem com a água, e o seu excesso pode provocar reacção, conferindo presa. Este é um processo muito lento que se dá a uma temperatura entre 130 e 400°C. Após a extinção obtém-se pó e grãos maiores, os quais podem ser moídos e adicionados à cal restante para aumentar a hidraulicidade [8, 11].

### 3.2.4 – Cimento

Na amassadura dos provetes de argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia foi utilizado cimento Portland de calcário CEM II / B-L 32,5 N<sup>7)</sup>, da marca Cimpor, fig. 3.4.

O cimento utilizado é constituído maioritariamente por clínquer (entre 65 e 79%), por calcário (entre 21 e 35%) e pela adição de sulfato de cálcio para regularização da presa [23, 62].

---

<sup>7)</sup> De acordo com NP EN 197-1 [23], a sigla “CEM II / B-L 32,5 N” significa que se trata de um cimento Portland composto (CEM II), de calcário (B - com 21% a 35% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários), com um teor TOC (carbono orgânico total) não excedendo 0,50% em massa (L), da classe de resistência 32,5 MPa (32,5) com uma resistência normal aos primeiros dias (N).



Fig. 3.4 – Cimento utilizado na amassadura das argamassas

O cimento Portland artificial é obtido a partir de uma mistura proporcionada de calcário (carbonato de cálcio) e margas, conteúdo argila (silicatos de alumínio e ferro) e outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro, que constituem a farinha ou “cru”. As matérias-primas são reduzidas a pó muito fino e, após o controlo da finura e composição química, são submetidas à acção de temperaturas da ordem dos 1450°C, em grandes fornos rotativos, sendo a homogeneização e a dispersão realizada por via seca [11].

A mistura das matérias-primas é feita de tal modo que, depois de perder a água e o dióxido de carbono, devido à elevada temperatura atingida no forno, esta tenha uma composição química dentro dos seguintes limites [11]:

- óxido de cálcio entre 60 e 68%;
- dióxido de enxofre entre 17 a 25%;
- trióxido de alumínio entre 2 a 9%;
- trióxido de ferro entre 0,5 e 6%.

Sujeitas àquela temperatura, as matérias-primas reagem entre si, com o apoio da fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% da matéria-prima, originando novos compostos. Através destes processos químicos e físicos, os produtos da reacção, ao arrefecerem de forma rápida, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis chamados de “clínquer” [11].

O clínquer é composto por quatro minerais artificiais principais, que são os silicatos bi e tricálcicos, o aluminato tricálcico e o ferro-aluminato tetracálcico [11]. Na fig. 3.5 representa-se o gráfico com os principais constituintes do clínquer e os seus contributos para as resistências mecânicas do cimento ao longo do tempo.

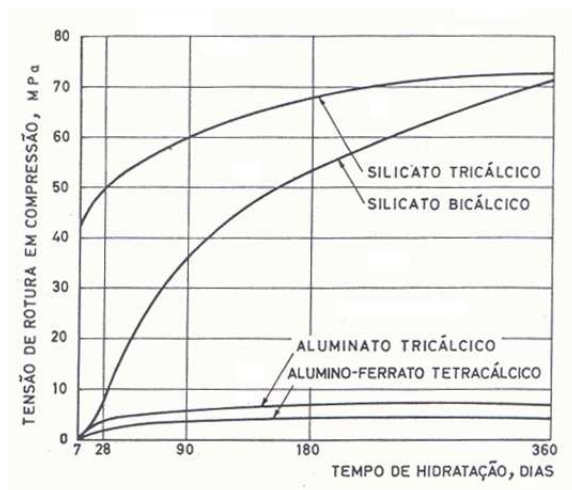


Fig. 3.5 – Contributos dos principais constituintes do clínquer para as resistências mecânicas do cimento ao longo do tempo [11]

À saída do forno o clínquer deve ser arrefecido rapidamente pois o silicato tricálcico (principal constituinte do clínquer) é instável a temperaturas inferiores a 1250°C; logo é importante conservar a sua estrutura e evitar-se que a fase líquida do clínquer cristalize, diminuindo a reactividade do aluminato de cálcio e não permitindo que se formem grandes cristais de óxido de magnésio, o que provocaria instabilidade e expansibilidade do volume da pasta de cimento endurecida. Depois de se proceder ao arrefecimento, o clínquer é armazenado, terminando o seu arrefecimento e entrando depois nos moinhos de bolas, onde é moído, juntamente com os adjuvantes, para facilitar a moagem, com aditivos (gesso) para lhe regular o tempo de presa, e outros, para lhe modificar as propriedades como por exemplo, a pozolana (caso das cinzas volantes) ou a escória de alto-forno [11].

As argamassas de cimento apresentam elevada resistência mecânica, rigidez (elevado módulo de elasticidade) e aderência ao suporte; no entanto, apresentam uma grande tendência de fendilhação.

### 3.2.5 – Água

Na execução dos provetes dos três tipos de argamassa foi utilizada água da rede pública de abastecimento da FCT (no dia 20 de Janeiro de 2009).

## 3.3 – Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas

Para conhecer algumas propriedades físicas dos materiais utilizados na amassadura das argamassas foram realizados ensaios de caracterização.

Dada a repetição de ensaios efectuados sobre as areias e os ligantes, optou-se pela descrição de cada ensaio, seguida dos respectivos gráficos com os valores médios obtidos.

No Anexo I deste trabalho apresentam-se os resultados individuais, médios e os respectivos desvios padrão.

Foram realizados ensaios de análise granulométrica relativamente aos agregados e de determinação da baridade dos agregados e ligantes.

Em seguida, apresentam-se as definições destas características e, sinteticamente, os procedimentos de ensaio e os resultados obtidos.

### **3.3.1 – Análise granulométrica das areias**

A análise granulométrica (por peneiração gravítica a seco) foi efectuada sobre as duas areias utilizadas na preparação das argamassas.

A granulometria corresponde à distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que compõem o agregado [11].

Este ensaio foi realizado fazendo passar o agregado (em agitador mecânico) através de uma série de peneiros da série principal ASTM, ordenados da malha mais larga (peneiro superior), para os de malha mais apertada (peneiro inferior) e pesando o material retido em cada peneiro. A série principal de peneiros ASTM inicia-se no peneiro com abertura da malha 0,075 mm e continua em progressão geométrica de razão 2, até à máxima dimensão do agregado [11].

Do ensaio de análise granulométrica obtém-se, para além da curva granulométrica, a máxima dimensão do agregado ( $D$ ), que corresponde à menor abertura da malha do peneiro da série principal, através da qual passa uma quantidade de agregado maior ou igual a 90%, a mínima dimensão do agregado ( $d$ ), que corresponde à maior abertura da malha do peneiro da série principal através da qual passa uma quantidade de agregado menor ou igual a 5% e, o módulo de finura ( $M_f$ ), que é obtido através da soma das percentagens totais retidas em cada peneiro da série principal (excepto o peneiro nº200, com abertura 0,075 mm), dividida por 100. A soma dos resíduos nos peneiros deverá ser igual, com 1% de tolerância, à massa inicial da amostra [11].

Um agregado é designado por dois números separados por um “traço”,  $D/d$ , cujo primeiro valor representa a sua máxima dimensão e o segundo valor representa a sua mínima dimensão [11].

O ensaio de análise granulométrica foi efectuado com os equipamentos e procedimento que se apresentam de seguida [11, 24], fig. 3.5.

- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - balança com precisão de 0,1 g;
  - peneiros ASTM com aberturas de malha quadrada de 4,76 mm (nº4), 2,38 mm (nº8), 1,19 mm (nº16), 0,595 mm (nº30), 0,297 mm (nº50), 0,149 mm (nº100) e 0,075 mm (nº200);
  - agitador mecânico de peneiros.
- Procedimento de ensaio:
  - i) esquarteamento das areias para obtenção das amostras representativas das areias;
  - ii) peneiração prévia das duas amostras de areias através do peneiro nº4;
  - iii) secagem das areias em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até obtenção de massa constante<sup>8)</sup>;
  - iv) colocação da amostra da areia, com massa de 1000 g, no interior do peneiro superior do agrupamento de peneiros, dispostos de forma a que a abertura das malhas diminua de cima para baixo;
  - v) colocação do conjunto dos peneiros no agitador de peneiros, funcionando durante 10 min para cada amostra;
  - vi) pesagem do material retido em cada um dos peneiros, incluindo o peneiro de fundo, que corresponde ao refugo.



1 – estufa ventilada; 2 – balança com precisão de 0,01 g; 3 – agitador mecânico e peneiros ASTM

Fig. 3.6 – Ensaio de análise granulométrica das areias

Os resultados deste ensaio determinam-se através da massa retida em cada peneiro.

Na fig. 3.7 e na tabela 3.1 apresentam-se, respectivamente, as curvas granulométricas e as características das duas areias utilizadas na preparação das argamassas.

Os resultados obtidos nas três amostras ensaiadas de cada areia encontram-se nas tabelas I.1 e I.2, no Anexo I.

<sup>8)</sup> A “massa constante” de um provete é atingida quando a variação entre duas pesagens intervaladas de 24 horas é menor ou igual a 0,1% da massa do provete [46].

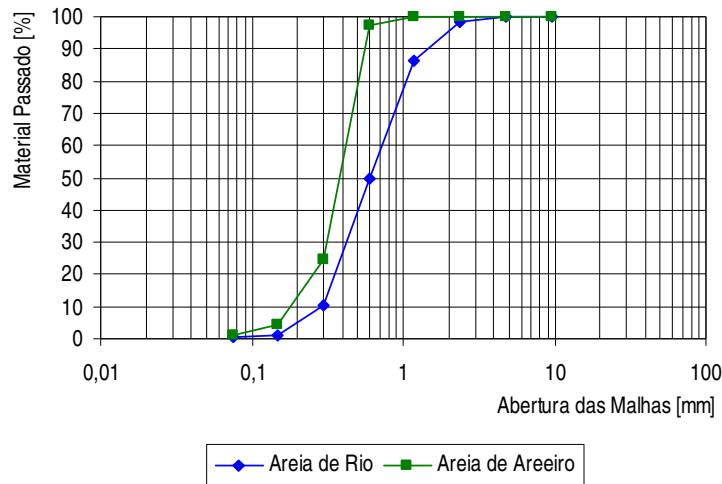


Fig. 3.7 – Curvas granulométricas das areias de rio e de areeiro

Tabela 3.1 – Características das areias de rio e de areeiro

Material	Módulo de finura	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]
Areia de rio	2,5	2,38	0,149
Areia de areeiro	1,7	0,595	0,149

### 3.3.2 – Baridade das areias e dos ligantes

A baridade define-se como a massa por unidade de volume aparente, o qual engloba a quantidade de vazios dentro das partículas dos agregados e entre essas partículas dos agregados e o recipiente onde estes estão contidos [33].

A baridade de um agregado depende do modo como as partículas estão arrançadas no recipiente, da sua forma e granulometria e do seu grau de compactação e humidade. Partículas com dimensões uniformes (agregado monogranular) podem ser arrançadas de determinada forma, mas adicionando outras partículas de menores dimensões, que se inserem nos vazios existentes entre elas, a baridade aumentará (pois ao preencher esses espaços aumenta-se a quantidade de material, mantendo o mesmo volume de recipiente) [11].

A determinação da baridade foi realizada para os dois tipos de areia e para os ligantes utilizados na preparação das argamassas, tendo como referências a ficha de ensaio Fe 15 [52] e o trabalho de investigação desenvolvido por V. Rato [41] no DEC-FCT/UNL (por sua vez baseada na norma NP EN 1097-3:2002 [25]).

Os valores de baridade foram necessários para passar do traço volumétrico para o traço ponderado e, assim, calcular as quantidades de agregados e ligantes a utilizar nas amassaduras, com base em massas, em vez de volumes.

O ensaio de determinação da baridade foi efectuado com os equipamentos e procedimento apresentados de seguida [25, 41, 52], fig. 3.8.

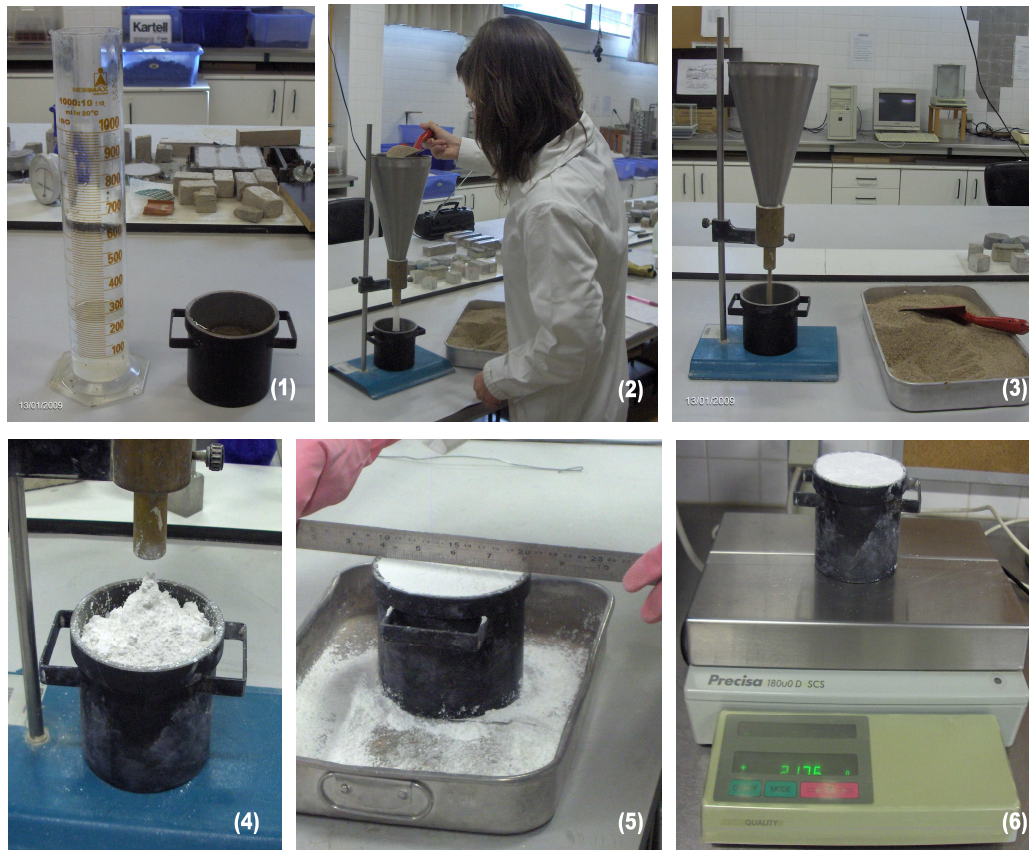
- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - balança com precisão de 0,1 g;
  - recipiente metálico cilíndrico;
  - funil metálico em suporte de altura regulável;
  - régua metálica.
- Procedimento de ensaio após confirmação da capacidade, em volume, do recipiente utilizado para determinação da baridade:
  - i) passagem do material (areia ou ligante) para o recipiente através do funil; o recipiente foi colocado de tal forma, que o seu aro superior se encontrava a uma distância de 50 mm do bordo inferior do funil, para garantir que a altura de queda dos materiais seja sempre a mesma, assegurando assim uma igual compactação;
  - ii) nivelamento da superfície do material em excesso no recipiente com uma régua metálica, com cuidado para não compactar;
  - iii) pesagem na balança, do recipiente preenchido, M (tendo-se inicialmente registado a sua tara).

**Nota:** Procedeu-se inicialmente à secagem dos materiais (agregados e ligantes) em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  para as partículas não estarem agregadas. Antes de os passar para o recipiente, através do funil, procedeu-se ao seu esquartelamento no tabuleiro.

O esquartelamento de uma amostra tem como objectivo tornar a amostra representativa, isto é, fazer com que se tenham diferentes partes do material. O esquartelamento faz-se colocando a amostra no tabuleiro, dividindo-a em quatro e retirando de três partes aleatórias.

No processo de enchimento do recipiente não houve compactação, a não ser a que foi exercida com a queda do material para o interior do recipiente devido à acção da gravidade.





– Em cima: areia de rio; em baixo: cal aérea

1 – proveta e recipiente para verificação do volume; 2, 3, 4 – passagem do material para o recipiente através do funil; 5 – nivelamento da superfície; 6 – pesagem do recipiente cheio de material

Fig. 3.8 – Ensaio de determinação da baridade das areias e dos ligantes

A determinação da baridade (Ba) é feita através do quociente entre a massa e o volume do recipiente, de acordo com a expressão [25, 41, 52]:

$$Ba = \frac{M}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.4)$$

sendo: M a massa do recipiente preenchido com o material (descontando a massa do recipiente) [kg] e V o volume do recipiente [m³].

Os resultados médios das três amostras de cada areia e ligante encontram-se nas figs. 3.9 e 3.10.

Os valores de baridade obtidos em cada amostra encontram-se nas tabelas I.3 a I.7 do Anexo I.



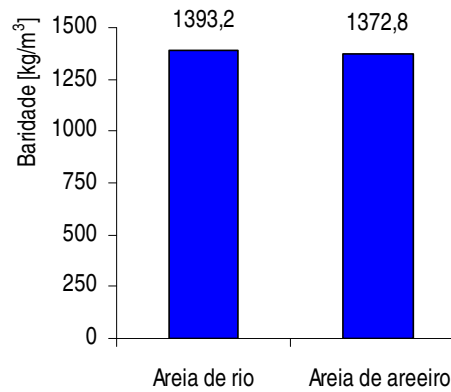


Fig. 3.9 – Baridade dos agregados utilizados nas argamassas

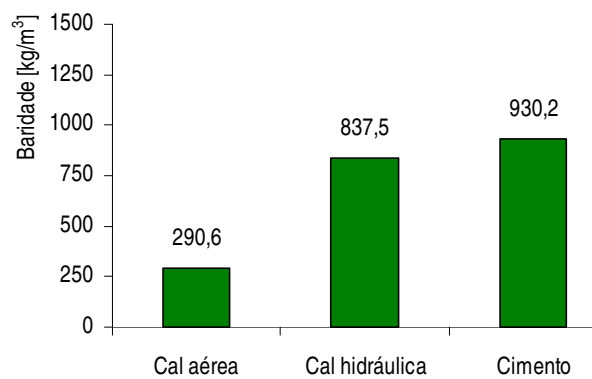


Fig. 3.10 – Baridade dos ligantes utilizados nas argamassas

### 3.4 – Preparação dos provetes de argamassa (amassadura)

Como referido na secção 3.2, foram moldados provetes de argamassa de três constituições diferentes: cal aérea e areia (CA), cal hidráulica, cal aérea e areia (CH) e cimento, cal aérea, e areia (CI).

As várias argamassas foram produzidas ao traço volumétrico 1:3 (ligante : areia), sendo as areias de rio e de areeiro utilizadas em partes iguais.

Foram moldados 40 provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm, recorrendo a moldes metálicos, semelhantes ao representado na fig. 3.11, para posteriormente fazer-se a caracterização da argamassa endurecida.

Os provetes distinguem-se da seguinte forma:

- 19 provetes de argamassa de cal aérea e areia;
- 11 provetes de argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia;
- 10 provetes de argamassa de cimento, cal aérea e areia.



Fig. 3.11 – Moldes utilizados para a execução dos provetes de argamassa

Dos provetes moldados, os referidos na tabela 3.2 foram utilizados na primeira série de ensaios e os na tabela 3.3 utilizados na segunda série, para alguns ensaios que foram repetidos<sup>9)</sup>.

Tabela 3.2 – Provetes utilizados na 1ª série de ensaios

Material	Provetes	
	Identificação	Quantidade
Argamassa de cal aérea (CA)	CA1 a CA8 <sup>1)</sup>	8
Argamassa de cal hidráulica e cal aérea (CH)	CH1 a CH6	6
Argamassa de cimento e cal aérea (CI)	CI1 a CI6	6

<sup>1)</sup> Foram utilizados mais dois provetes de cal aérea e areia (CA7 e CA8) para a realização do ensaio de profundidade de carbonatação ao longo do tempo da argamassa endurecida.

Tabela 3.3 – Provetes utilizados na 2ª série de ensaios

Material	Provetes	
	Identificação	Quantidade
Argamassa de cal aérea (CA)	CA12 a CA14	3
Argamassa de cal hidráulica e cal aérea (CH)	CH7 a CH9	3
Argamassa de cimento e cal aérea (CI)	CI7 a CI10 <sup>1)</sup>	4

<sup>1)</sup> Foram utilizados quatro provetes de cimento e cal aérea e não três, como nos outros casos, pois estes quatro provetes foram obtidos de amassaduras diferentes.

A preparação das argamassas realizou-se com base na ficha de ensaio Fe 19 [53] e na norma NP EN 196-1:2006 [26].

Na preparação das argamassas estabeleceu-se um intervalo ideal de espalhamento, que varia consoante o tipo de utilização que se queira dar às argamassas.

<sup>9)</sup> Devido a uma avaria técnica na câmara climática durante o ensaio de resistência face aos cloretos (referida na secção 4.3.1), foi necessário considerar uma segunda série de provetes para realização de ensaios de durabilidade face aos cloretos. Para isso, também foram repetidos alguns dos ensaios de caracterização da argamassa endurecida, entre os quais: massa volúmica real, massa volúmica aparente, porosidade aberta, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e resistência à compressão.

Neste caso, depois de ter consultado várias fontes bibliográficas, entre as quais a tese de Doutoramento de F. Pinho [35] em que o intervalo médio obtido foi de 81%, a tese de Doutoramento de V. Rato [41] em que o intervalo variou entre 70 e 75% e a tese de Doutoramento de P. Faria [13] em que as argamassas de cal aérea e areia obtiveram um valor de 74%, as argamassas de cal aérea, cal hidráulica e areia um valor de 73% e as argamassas de cal aérea, cimento e cal aérea um valor de 67%, para este estudo estabeleceu-se um intervalo de espalhamento<sup>10)</sup> entre 60% e 80%.

Os equipamentos de ensaio utilizados e o procedimento seguido na realização das amassaduras [53], fig. 3.12, foram os que se apresentam de seguida.

- Equipamentos de ensaio:
  - misturador mecânico de argamassas;
  - cronómetro;
  - balança com precisão de 0,01 g;
  - proveta graduada.
- Procedimento de ensaio:
  - i) pesagem de cada constituinte da argamassa<sup>11)</sup>;
  - ii) mistura a seco dos agregados e do ligante;
  - iii) colocação da mistura na cuba;
  - iv) entrada em funcionamento do misturador mecânico (com contagem do tempo, 45 s), adicionando simultaneamente a quantidade de água previamente determinada no ensaio de espalhamento<sup>12)</sup> (factor  $a/l$ );
  - v) limpeza dos bordos da cuba durante um intervalo de 30 s;
  - vi) nova amassadura mecânica, durante mais 60 s.

O misturador mecânico de argamassas do laboratório, representado na fig. 3.12, com dimensões normalizadas, possui uma pá que efectua movimentos de rotação axial, à velocidade de 120 rpm., e planetário, à velocidade de 60 rpm [53].

---

<sup>10)</sup> Na secção 3.5 faz-se a descrição deste ensaio.

<sup>11)</sup> As baridades dos constituintes, previamente determinadas (ponto 3.3.2), permitiram determinar de forma rigorosa as massas dos materiais em causa, para respeitar os traços volumétricos definidos.

<sup>12)</sup> Amassadura mecânica.



Fig. 3.12 – Misturador mecânico de argamassas

Partindo do volume de areia a utilizar na amassadura (limitado pela capacidade do misturador mecânico de argamassas do laboratório) e multiplicando-o pela respectiva baridade, obteve-se a massa de areia a utilizar na amassadura. Fazendo corresponder ao volume da areia o traço volumétrico pretendido, obteve-se o volume dos ligantes a utilizar. Posteriormente, multiplicaram-se os volumes pelas respectivas baridades, obtendo-se a massa de cada um, necessária para a argamassa. Partindo do volume de seis provetes de 4cmx4cmx16cm (1536 cm<sup>3</sup>), considerou-se um volume de referência de 1250 cm<sup>3</sup> para cada areia a utilizar em cada amassadura. A quantidade de areia pela qual de optou, foi a adequada para amassaduras na cuba utilizada e permitia o preenchimento de mais do que os seis provetes necessários (alguns ficaram de reserva).

### 3.4.1 – Argamassa de cal aérea e areia

Considerando o traço volumétrico de 1:3 de cal aérea e areia (a que corresponde 1:1,5:1,5 de cal aérea, areia de rio e areia de areeiro) e o volume de cada areia (1250 cm<sup>3</sup>, num total de 2500 cm<sup>3</sup>) pôde-se saber a quantidade de ligante desta argamassa. Assim sendo, o volume de ligante (cal aérea) a utilizar foi 1/3 do volume total das areias; tal corresponde a 833,3 cm<sup>3</sup>.

Para conhecer o factor *a/l* começou-se por fazer uma amassadura prévia, utilizando pequenas quantidades de material (para minimizar desperdícios). Nessa amassadura chegou-se a um valor de *a/l* de 1,03.

Conhecidos os valores da baridade de cada componente, determinou-se a quantidade de cada material a utilizar nesta argamassa (tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Massa de cada material utilizada na 1ª amassadura prévia da argamassa de cal aérea e areia

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Massa [g]
Cal aérea	290,6	833,3	241,7
Areia de rio	1393,2	1250,0	1737,5
Areia de areeiro	1372,8		1712,5

Conhecido o valor de *a/l* procedeu-se a uma nova amassadura utilizando agora quantidades ligeiramente inferiores às indicadas na tabela 3.4, como se representa na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Massa de cada material utilizada na 2ª amassadura e na amassadura final da argamassa de cal aérea e areia

Material	Baridade [kg/m³]	Volume [cm³]	Massa [g]
Cal aérea	290,6	800,0	232,0
Areia de rio	1393,2	1200,0	1668,0
Areia de areeiro	1372,8		1644,0

Seguidamente, realizou-se o ensaio de espalhamento, obtendo-se o valor de 105%. Como este valor foi muito elevado relativamente ao intervalo considerado, diminui-se o factor  $a/l$ . Assim, e mantendo a mesma quantidade de material utilizada na mistura seca anterior, diminuiu-se a quantidade de água para 720 cm³ e fez-se uma nova amassadura considerando um factor  $a/l$  de 0,90. Para esta nova amassadura voltou-se a realizar o ensaio de espalhamento, chegando a um valor de 16,9 cm (68%). Como este valor já estava dentro do intervalo ideal de espalhamento pré-definido (na secção 3.4), esta amassadura foi considerada a final<sup>13)</sup>.

### 3.4.2 – Argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia

Para conhecer o factor  $a/l$  e não haver desperdícios de material, começou-se por uma amassadura prévia, utilizando pequenas quantidades de material.

Nesta amassadura chegou-se a um valor  $a/l$  de 0,96, cujo valor de espalhamento obtido foi de 74%. Com base neste valor (incluído no intervalo pré-definido, conforme a secção 3.4) preparou-se a argamassa final, a utilizar na moldagem dos provetes.

Com efeito, sabendo o traço volumétrico (1:3) de ligante e areia (a que corresponde o traço 1:1:3:3 de cal hidráulica, cal aérea, areia de rio e areia de areeiro) e conhecidos os valores da baridade de cada material, determinou-se a quantidade a utilizar de cada constituinte, tabela 3.6. A quantidade de água utilizada foi de 864 cm³.

Tabela 3.6 – Massa de cada material utilizada na amassadura final da argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia

Material	Baridade [kg/m³]	Volume [cm³]	Massa [g]
Cal hidráulica	837,5	450,0	378,0
Cal aérea	290,6		130,5
Areia de rio	1393,2	1350,0	1876,5
Areia de areeiro	1372,8		1849,5

Para a argamassa final realizou-se o ensaio de espalhamento. O valor obtido foi de 65%.

<sup>13)</sup> A primeira “amassadura prévia” serviu para determinar a quantidade de água, tal que o espalhamento obtido estivesse centrado no intervalo 60-80%. Como tal não aconteceu, teve que se realizar nova amassadura (2ª “amassadura prévia”) que cumprisse aquela condição.

### 3.4.3 – Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia

Tal como nas argamassas anteriores, começou-se por fazer uma amassadura prévia, utilizando pequenas quantidades de materiais, para conhecer o factor  $a/l$ . Neste procedimento chegou-se a um valor  $a/l$  de 0,91, cujo valor de espalhamento foi de 85%.

Em seguida, sabendo o traço volumétrico (1:3) de ligantes e areias (a que corresponde o traço 1:1:3:3 de cimento, cal aérea, areia de rio e areia de areeiro) e conhecendo os valores de baridade de cada constituinte (tabela 3.7), preparou-se a argamassa final a utilizar na moldagem dos provetes.

Nesta amassadura final, decidiu-se utilizar um factor  $a/l$  de 0,90 pois a areia de rio estava ligeiramente húmida. A quantidade de água utilizada foi de 720 cm<sup>3</sup>.

Tabela 3.7 – Massa de cada material utilizada na amassadura final da argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Massa [g]
Cimento	930,2	400,0	372,0
Cal aérea	290,6		116,0
Areia de rio	1393,2	1200,0	1668,0
Areia de areeiro	1372,8		1644,0

Para esta argamassa voltou-se a realizar o ensaio de espalhamento. O valor obtido foi de 78%.

Os valores de espalhamento obtidos com as argamassas fazem sentido em termos de trabalhabilidades obtidas com cada uma delas. Com efeito, as argamassas só de cais são mais trabalháveis (logo podem ser aplicadas com menor espalhamento – o que é benéfico face à retracção que vai ocorrer). As argamassas com cimento são menos trabalháveis, necessitando de ter mais espalhamento para a sua aplicação.

## 3.5 – Caracterização das argamassas frescas e condições de cura

Sobre as argamassas frescas foram realizados ensaios de consistência por espalhamento, de acordo com a ficha de ensaio Fe 25 [54] e com a norma EN 1015-3:1999 [10].

A determinação do valor de espalhamento das argamassas frescas tem como objectivo aferir a trabalhabilidade da argamassa, isto é, determinar a melhor consistência possível para cada aplicação (argamassa de execução de rebocos, assentamentos de alvenaria, regularização, etc).

Para chegar à consistência desejada das argamassas realizaram-se vários ensaios de consistência por espalhamento, com os seguintes equipamentos e segundo o procedimento apresentado a seguir [54], fig. 3.13.

- Equipamentos de ensaio:
  - mesa de consistência;
  - molde tronco-cônico;
  - craveira;
  - varão metálico de compactação, com 15 mm de diâmetro;
  - régua metálica.
- Procedimento de ensaio:
  - i) verificação do estado de secagem e limpeza do equipamento;
  - ii) colocação do molde no centro da mesa de consistência;
  - iii) enchimento do molde em duas camadas de altura sensivelmente iguais;
  - iv) compactação com o varão (20 pancadas em cada camada), mantendo o molde fixo na mesa de consistência;
  - v) nivelamento da superfície, retirando-se o molde com cuidado;
  - vi) rotação da manivela, provocando 15 pancadas em 15 s;
  - vii) medição com a craveira, segundo os quatro diâmetros gravados no tampo da mesa, do afastamento entre dois pontos de intersecção de cada um deles com o contorno da argamassa, após o espalhamento provocado pelas 15 pancadas;
  - viii) cálculo da média das quatro medições,  $d$ , arredondada à unidade.

Neste ensaio teve-se o cuidado dos equipamentos (mesa de consistência, molde tronco-cônico e varão) estarem sempre com o mesmo grau de humedecimento para que os resultados pudessem ser comparáveis e não influenciados por um teor de humidade variável da mesa de consistência.



1 – compactação; 2 – nivelamento da superfície; 3 – aspecto da argamassa após se retirar o molde; 4 – aspecto da argamassa no final do ensaio e medição com a craveira

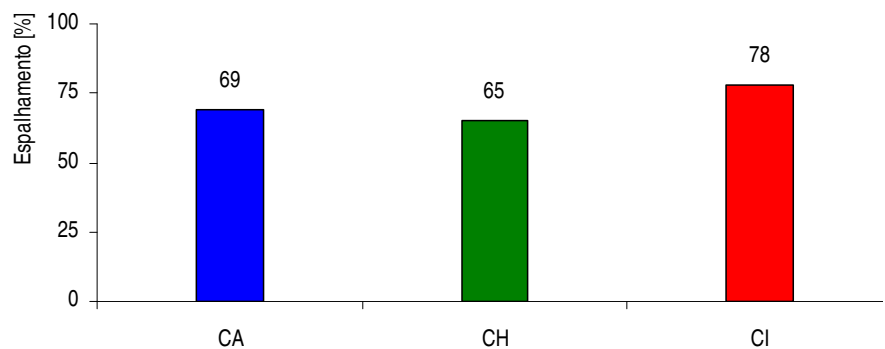
Fig. 3.13 – Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas frescas

O valor de espalhamento (Esp) arredondado à unidade, é obtido de acordo com a seguinte expressão [54]:

$$\text{Esp} = \frac{d - 10}{10} \times 100 \quad [\%] \quad (3.5)$$

sendo: d a média dos quatro valores d' [cm]; 10 o diâmetro interior da base do molde tronco-cónico [cm].

Como foi referido nos pontos 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 realizaram-se ensaios de espalhamento para cada tipo de argamassa. Na fig. 3.14 sintetizam-se os valores finais obtidos nas argamassas e, na tabela I.8 do Anexo I, os valores das várias amassaduras efectuadas.



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

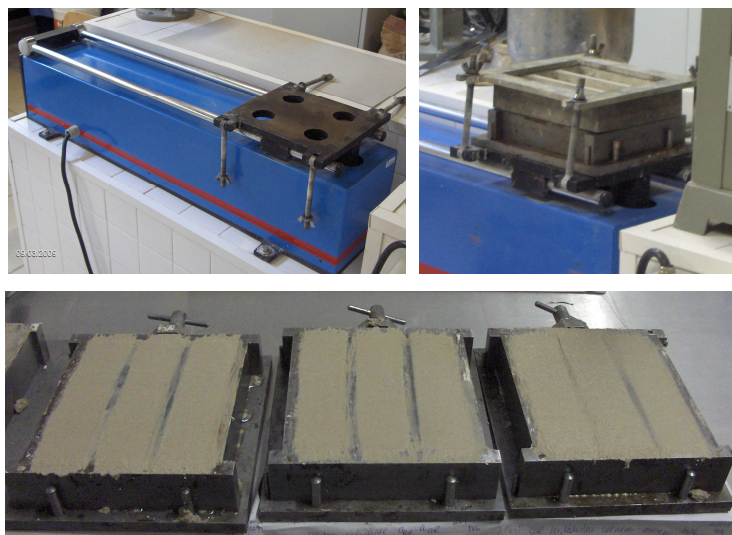
Fig. 3.14 – Valores de espalhamento das argamassas frescas

Logo após o ensaio consistência por espalhamento procedeu-se ao enchimento dos moldes dos provetes, de acordo com a Fe 19 [53].

A moldagem dos provetes decorreu durante o dia 20 de Janeiro de 2009, nas condições que se apresentam de seguida, fig. 3.15.

- Equipamentos de ensaio:
  - compactador mecânico;
  - moldes prismáticos de 4cmx4cmx16cm.
- Procedimento de ensaio:
  - i) colocação do molde bem fixo na mesa do compactador mecânico;
  - ii) enchimento do molde em duas camadas de alturas sensivelmente iguais;
  - iii) compactação de cada camada com vinte pancadas;
  - iv) remoção do excesso de argamassa.





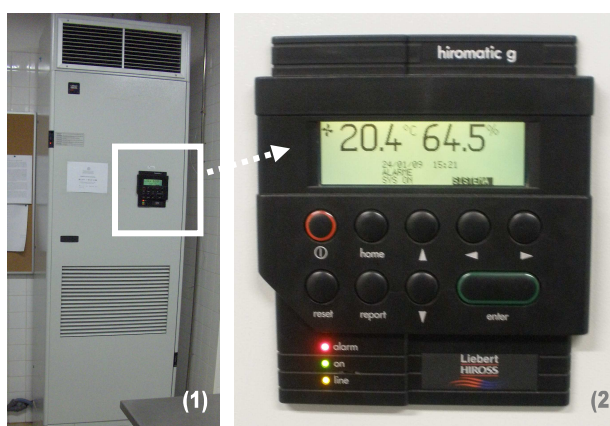
- Em cima: equipamento utilizado; em baixo: moldes já preenchidos, neste caso com argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.15 – Moldagem e compactação mecânica dos provetes

Todos os provetes referidos na tabela 3.2 (provetes da 1ª série de ensaios) resultaram de amassadura e compactação mecânica, excepto os provetes CA7 e CA8, cujas argamassas tiveram amassadura mecânica mas compactação manual.

Os provetes referidos na tabela 3.3 (provetes da 2ª série de ensaios) resultaram de amassaduras mecânicas e foram compactados manualmente, excepto os provetes de cal hidráulica, cal aérea e areia, CH7, CH8 e CH9, que tiveram uma compactação mecânica<sup>14</sup>).

Após a moldagem dos provetes, estes foram levados para uma sala climatizada onde ocorreu a cura, num ambiente com as seguintes condições: temperatura de  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ , fig. 3.16.



1 – humidificador; 2 – condições de temperatura e humidade relativa na sala de ambiente condicionado

Fig. 3.16 – Condições de temperatura e humidade relativa da sala com ambiente condicionado

<sup>14</sup> Estes provetes (CH7, CH8 e CH9) correspondem aos últimos de cada argamassa a ser moldados, e cuja utilização não estava prevista neste trabalho. Porém, uma avaria ocorrida na câmara climática fez com que os provetes iniciais sofressem perturbações no ensaio de resistência aos cloretos, levando a que os provetes CH7, CH8 e CH9 tivessem que ser usados numa 2ª série de ensaios na câmara climática. Situação idêntica ocorreu com os provetes CA7, CA8, CA9, CI7, CI8, CI9 e CI10, como se verá mais adiante.

Os provetes permaneceram nos moldes durante 7 dias. Após este período, foram desmoldados mas permaneceram na sala de cura, com as mesmas condições ambientais, fig. 3.17.



Fig. 3.17 – Provetes desmoldados utilizados na 1ª série de ensaios de caracterização

Após a desmoldagem, os provetes foram colocados em estantes, cada um deles sobre dois suportes de plástico para garantir o contacto da face inferior com o ambiente, fig. 3.18.

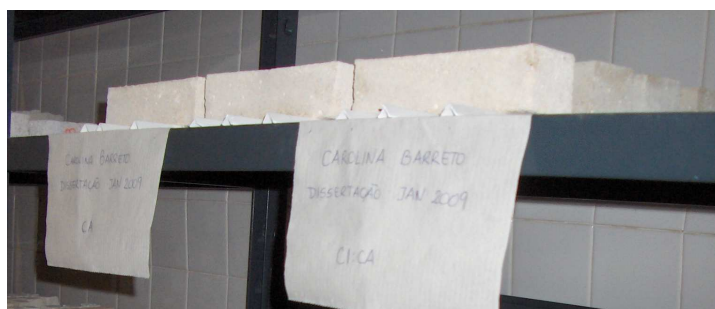


Fig. 3.18 – Provetes desmoldados durante o processo de cura

### 3.6 – Caracterização das argamassas endurecidas

Para caracterizar a argamassa endurecida realizaram-se diversos ensaios com os provetes da primeira série.

No caso da segunda série de provetes só alguns dos ensaios foram realizados, devido ao menor número de provetes disponíveis. Na tabela 3.8 referem-se os ensaios realizados sobre a primeira e a segunda séries de provetes.

Tabela 3.8 – Características estudadas nas argamassas endurecidas

Características estudadas		Primeira série de provetes	Segunda série de provetes
Características Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico	✓	✓
	Resistência à tracção por flexão	✓	✓
	Resistência à compressão	✓	✓
Características Físicas	Variação dimensional linear	✓	✓
	Massa volúmica aparente	✓	✓
	Massa volúmica real	✓	✓
	Porosidade aberta	✓	✓
	Absorção de água por capilaridade	✓	--
	Secagem	✓	--
Características Químicas	Profundidade de carbonatação	✓	--

Aquando da repetição dos ensaios, os resultados da segunda série são indicados logo em seguida aos da primeira. Previamente à realização dos ensaios de caracterização da argamassa endurecida, todos os provetes utilizados nos ensaios foram pesados. Nas tabelas I.9 a I.11 no Anexo I indicam-se os valores das pesagens.

No Anexo I encontram-se os resultados de cada provete ensaiado, assim como os desvios padrão, relativamente à caracterização das argamassas endurecidas.

### 3.6.1 – Características mecânicas

Para a caracterização mecânica da argamassa endurecida (tabela 3.8) foram realizados ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e resistência à compressão.

## **– Módulo de elasticidade dinâmico**

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas permite avaliar a deformabilidade e, de certa forma, a homogeneidade do material. Valores de módulo de elasticidade dinâmico elevados correspondem a materiais com maior rigidez, enquanto valores baixos correspondem a materiais com elevada deformabilidade. Esta característica mecânica está ligada aos fenómenos patológicos que os revestimentos de argamassas podem sofrer, pois uma diferente rigidez entre o revestimento e o suporte leva a que, na presença de acções indirectas (como, por exemplo, assentamentos diferenciais), o reboco e o suporte apresentem deformações diferentes, dando origem à fissuração do reboco ou até à sua separação do suporte.

A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão ligadas à capacidade de absorver deformações, que podem ser de algum modo avaliadas através do módulo de elasticidade.

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico é um ensaio que se caracteriza por não haver deformação, ao contrário do método estático. Neste ensaio obtêm-se valores mais precisos do que pelo método dinâmico, porém as reduzidas dimensões dos provetes de 4cmx4cmx16cm desaconselham a utilização do módulo de elasticidade estático (ou secante), obtido no ensaio de compressão (fig. 3.22-2), uma vez que, além da compressão, desenvolvem-se mecanismos de corte que interferem nos resultados [33].

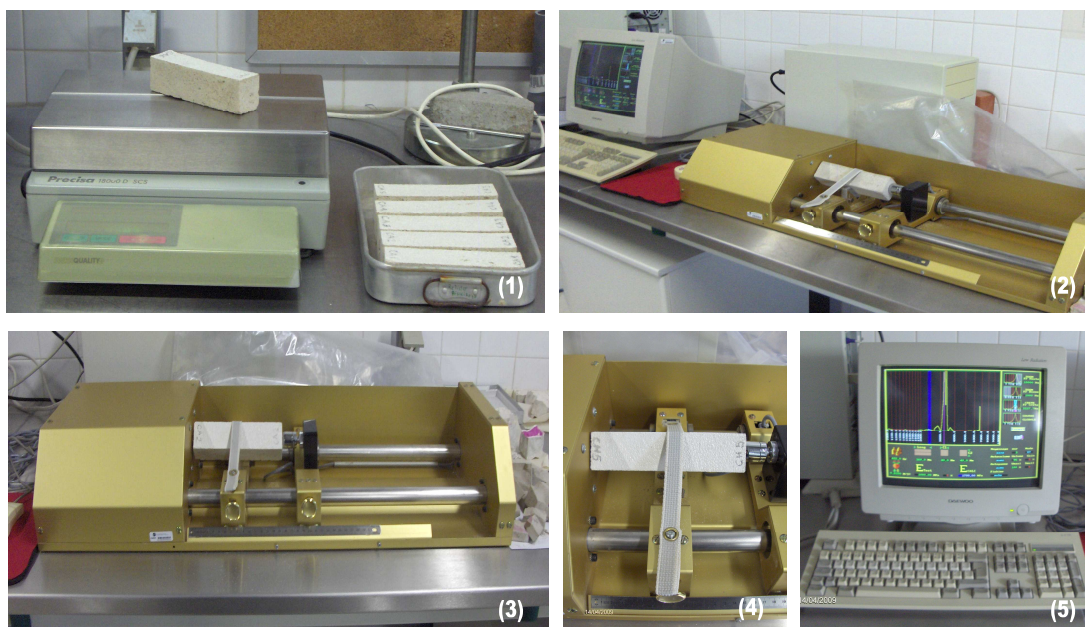
O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado aos 83 dias (1ª série) e aos 163 dias de idade (2ª série) dos provetes após a moldagem, de acordo com a ficha de ensaio Fe 08 [50]. Nestes ensaios foram utilizados provetes inteiros, antes de serem ensaiados à tracção por flexão e à compressão.

Em seguida, referem-se os equipamentos e o procedimento relacionados com este ensaio [50], fig. 3.19:

- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - balança com precisão de 0,1g;
  - equipamento adequado para a emissão de vibrações e registo da frequência de ressonância longitudinal associada.
- Procedimento de ensaio:
  - i) secagem dos provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  até massa constante;
  - ii) colocação de cada provete no equipamento, aplicando numa extremidade uma fonte emissora e, na outra, a unidade de recepção;
  - iii) ligação do oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador, com registo das amplitudes das vibrações, correspondendo as condições de ressonância às amplitudes máximas.

A frequência de ressonância fundamental longitudinal corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima.

Neste ensaio devem ser efectuadas, no mínimo, duas determinações, com o provete em posições diferentes, cujos valores não devem diferir mais do que 5%. O valor final corresponde à média dos dois anteriores.



1 – pesagem dos provetes após secagem em estufa ventilada (até obtenção de massa constante);  
2 – equipamento para a emissão de vibrações e registo da frequência de ressonância longitudinal;  
3, 4 – posicionamento dos provetes no equipamento; 5 – “out put” de resultados

Fig. 3.19 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico

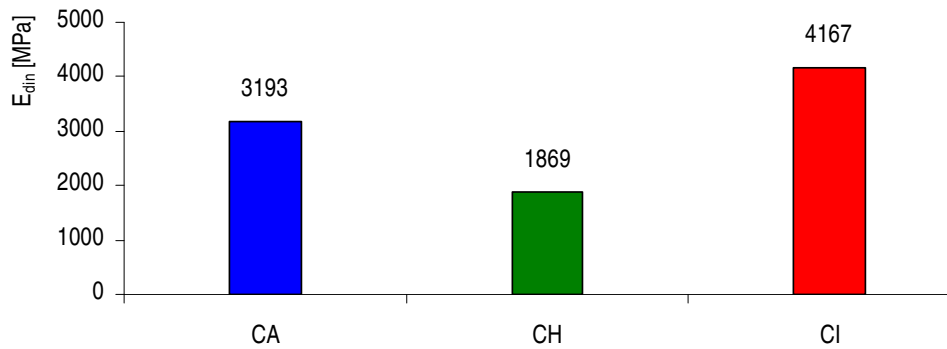
O programa de cálculo determina automaticamente o valor do módulo de elasticidade dinâmico, a partir do comprimento do provete  $L$ , da frequência de ressonância longitudinal calculada  $f_0$ , da massa volumica do provete  $\rho$  (calculada a partir da sua massa e do seu volume) e da aceleração da gravidade  $g$ . Na expressão 3.6 indica-se a equação correspondente [50]:

$$E_{\text{din}} = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [\text{MPa}] \quad (3.6)$$

sendo:  $L$  o comprimento do provete [m];  $f_0$  a frequência de ressonância longitudinal [Hz];  $\rho$  a massa volumica [ $\text{N/m}^3$ ];  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

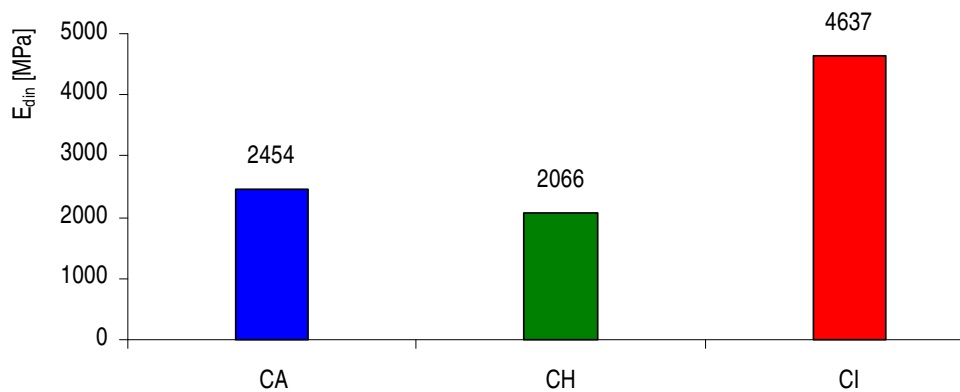
Nas figs. 3.20 e 3.21 indicam-se os resultados médios obtidos neste ensaio, estando os valores individuais apresentados nas tabelas I.12 e I.13 no Anexo I, relativamente aos provetes das 1ª e 2ª séries, respectivamente.





<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.20 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.21 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

Ao analisar as figs. 3.20 e 3.21, observa-se que apesar dos valores obtidos nas duas séries de provetes no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico serem diferentes, a variação relativa mantém-se, isto é, o valor dos provetes de argamassa de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea manteve-se inferior ao dos provetes de argamassa de cal aérea bastarda de cimento e cal aérea e o valor dos provetes de argamassa bastarda de cimento e cal aérea manteve-se superior.

Considerando que os componentes principais da alvenaria ordinária são a argamassa de cal aérea (do tipo CA) e pedra (calcária), é possível que o módulo de elasticidade da alvenaria seja superior ao registado pela argamassa de cal aérea e areia. Dessa forma, e considerando que os valores de módulo de elasticidade dinâmico da argamassa bastarda de cimento e cal aérea são substancialmente inferiores aos da argamassa só de cimento [13], admite-se alguma compatibilidade, ao nível do módulo de elasticidade dinâmico entre as argamassas de cal aérea e a bastarda de cimento e cal aérea.

### – Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão

As resistências mecânicas das argamassas são parâmetros importantes para a sua caracterização pois através deles podemos conhecer a sua capacidade resistente. De facto, embora estes parâmetros não sejam os mais importantes na caracterização de uma argamassa (pois do ponto de vista mecânico de uma argamassa, a rigidez é mais importante do que a resistência), eles devem ser tidos em conta no processo de selecção de uma argamassa de revestimento, de assentamento ou outra.

Para esta caracterização, em primeiro lugar é efectuado o ensaio de resistência à tracção por flexão e, com as metades dos provetes resultantes, realiza-se o ensaio de resistência à compressão, do qual resultam apenas as duas extremidades de cada “meio provete” (as quais são depois usadas em ensaios de determinação da massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta).

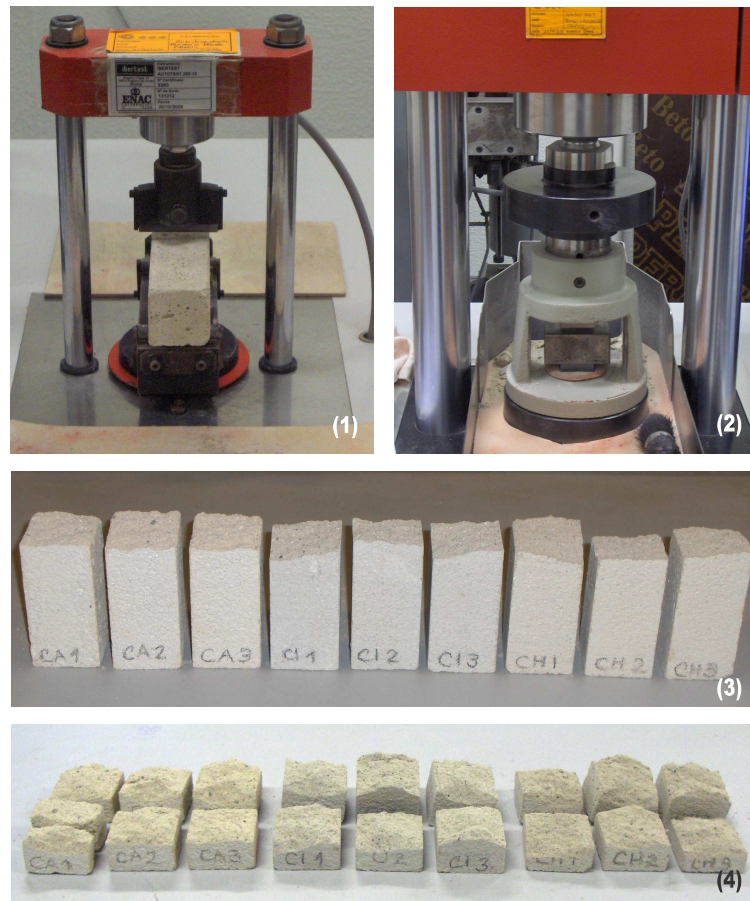
Os ensaios de determinação das resistências à tracção por flexão e à compressão foram realizados aos 83 dias (1ª série) e aos 163 dias de idade (2ª série) dos provetes.

Os ensaios foram efectuados na empresa Secil-Outão, de acordo com a norma NP EN 196-1:2006 [26], tendo sido utilizados os seguintes equipamentos e procedimento de ensaio, fig. 3.22.

- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - máquina Autotest-200\10 (prensa);
  - suporte para ensaio de flexão;
  - suporte para ensaio de compressão.
- Procedimento do ensaio de determinação da resistência à tracção por flexão:
  - i) secagem dos provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$  até massa constante;
  - ii) colocação dos provetes sobre o suporte para o ensaio de flexão, com os pontos de apoio afastados de 100 mm e as faces de moldagem em contacto com as superfícies do carregamento;
  - iii) aplicação da carga a meio vão, com uma velocidade de 0,05 KN/s ( $50 \pm 10$  N/s), até à rotura .
- Procedimento do ensaio de determinação da resistência à compressão:
  - i) colocação dos meios provetes<sup>15)</sup> resultantes do ensaio de flexão no suporte para ensaio de compressão (com uma área de contacto de 1600 mm<sup>2</sup>) e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies do carregamento;
  - ii) aplicação da carga com uma velocidade de 2,4 KN/s ( $2400 \pm 200$  N/s), até à rotura.

---

<sup>15)</sup> Neste caso, o ensaio realizou-se apenas com uma das metades resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão.



1 – ensaio de tracção por flexão; 2 – ensaio de compressão; 3 – meios provetes resultantes do ensaio de tracção por flexão; 4 – extremidades dos provetes resultantes do ensaio de compressão

Fig. 3.22 – Ensaio para determinação das tensões de resistência à tracção por flexão e à compressão, neste caso referente à 1ª série de provetes

Os resultados para o ensaio de tracção por flexão são obtidos pela determinação da resistência à tracção por flexão ( $\sigma_f$ ), de acordo com a seguinte expressão de cálculo da tensão máxima à flexão simples, em secções rectangulares [26]:

$$\sigma_f = \frac{M \times c}{I} = \frac{\frac{F_f \times L}{4} \times \frac{h}{2}}{\frac{b \times h^3}{12}} = \frac{3}{2} \times F_f \times \frac{L}{b^3} \quad [\text{MPa}] \quad (3.7)$$

sendo: M o momento flector devido à carga aplicada a meio vão do provete [ $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ ]; c a distância à linha neutra ( $c=h/2$ ) [mm]; I o momento de inércia [ $\text{mm}^4$ ];  $F_f$  a força de rotura à flexão [N]; L a distância entre os apoios do suporte do provete [mm] (neste caso, 100 mm); b e h os lados da secção quadrada do provete [mm] (neste caso,  $b=h=40$  mm).

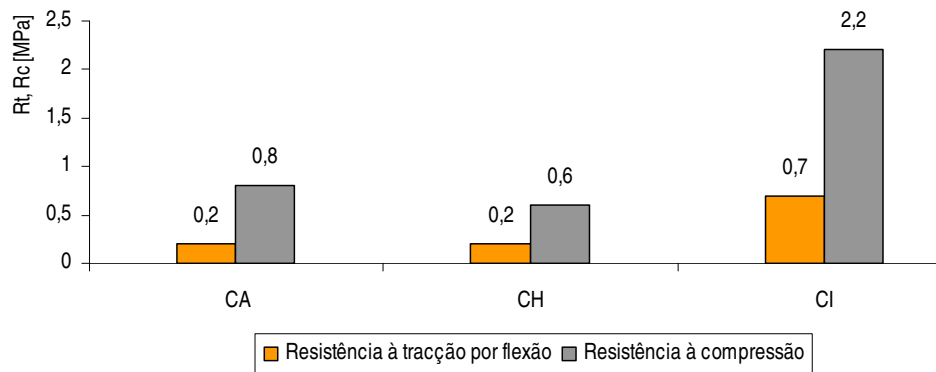


No caso do ensaio de compressão, os resultados são obtidos pela determinação da resistência à compressão ( $\sigma_c$ ), de acordo com a seguinte expressão [26]<sup>16)</sup>:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (3.8)$$

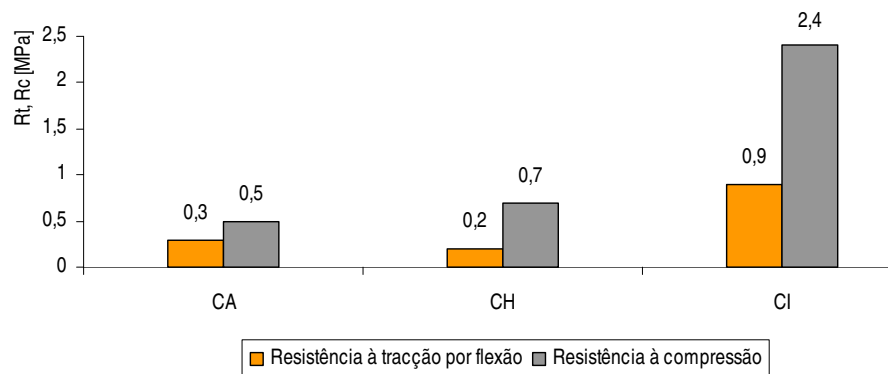
sendo:  $F_c$  a força de rotura à compressão [N];  $A$  a área de contacto (neste caso,  $A = 40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$ ).

Os resultados médios da resistência à tracção por flexão e da resistência à compressão dos provetes de argamassa da 1ª e 2ª séries encontram-se expressos nas figs. 3.23 e 3.24, respectivamente.



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.23 – Resistências mecânicas médias dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.24 – Resistências mecânicas médias dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

<sup>16)</sup> Os valores de tensão de resistência à tracção por flexão e à compressão foram fornecidos directamente pela empresa Secil, não tendo os ensaios sido realizados pela autora do trabalho.

Nas tabelas I.14 e I.15 do Anexo I, indicam-se as resistências à tracção por flexão e à compressão obtidas para cada tipo de provete ensaiado e as respectivas forças  $F_t$  e  $F_c$ , calculadas através das expressões 3.7 e 3.8.

Do mesmo modo que para o módulo de elasticidade dinâmico, admitindo que a alvenaria ordinária é constituída por argamassa de cal aérea (do tipo CA) e pedra (calcária), é possível que as resistências mecânicas resultantes sejam superiores às registadas pela argamassa de cal aérea.

A argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea apresentou, de um modo geral, resistências mecânicas semelhantes à argamassa de cal aérea e ambas registaram resistências mecânicas cerca de 2 a 3 vezes inferiores à bastarda de cimento e cal aérea, o que, mesmo considerando a existência de pedra na alvenaria ordinária, pode condicionar a aplicação de argamassa bastarda de cimento e cal aérea sobre os paramentos das paredes antigas.

### **3.6.2 – Características físicas**

Para a caracterização física da argamassa endurecida (tabela 3.8) foram realizados ensaios para determinação das variações dimensionais lineares, da massa volúmica real, massa volúmica aparente, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e secagem.

O ensaio de porometria por intrusão de mercúrio não pôde ser realizado; no entanto, como se considera ser um ensaio importante no contexto deste trabalho faz-se, uma breve descrição sobre o seu procedimento e resultados que permite obter.

#### **– Variações dimensionais lineares**

O ensaio de determinação de variações dimensionais lineares foi iniciado enquanto os provetes se encontravam ainda nos moldes e continuou depois da sua desmoldagem, fig. 3.25.

Enquanto os provetes estiveram nos moldes, a medição da variação dimensional linear foi feita diariamente, durante uma semana. A medição foi realizada com o auxílio de uma craveira com precisão de 0,1 mm, de uma régua, de uma lupa e de uma lanterna para uma mais correcta medição.

A variação dimensional linear ao longo do tempo corresponde à soma das variações lineares parciais.

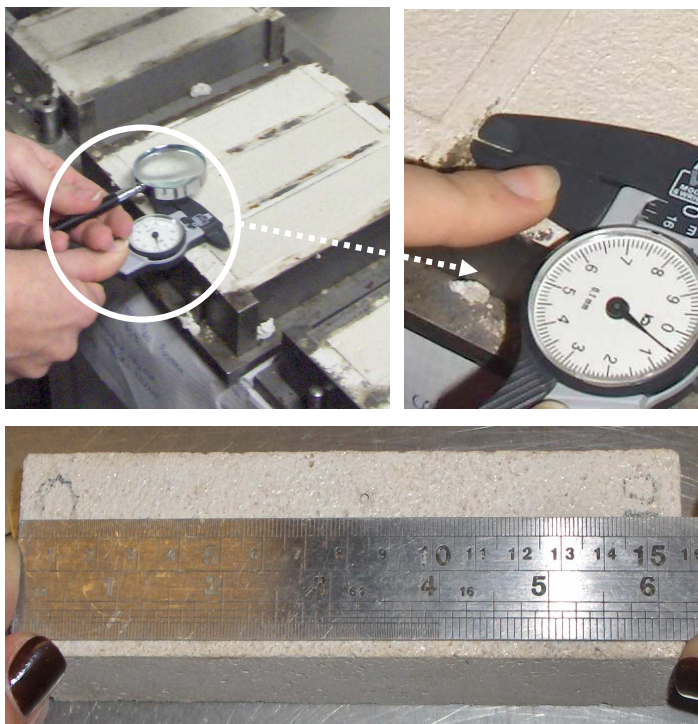
Depois de desmoldados, a medição foi feita semanalmente até aos 76 dias de idade, com o auxílio de uma régua metálica, com uma precisão máxima de 0,5 mm.

Neste caso, as variações dimensionais lineares, dos provetes desmoldados, correspondem à medição das distâncias entre as extremidades de cada provete.

Os resultados são expressos através do traçado das curvas médias das variações dimensionais, em [mm/m], em função do tempo de secagem.

Nas tabelas I.16 e I.17 do Anexo I apresentam-se os valores individuais, obtidos nas variações dimensionais lineares, e na fig. 3.26 os valores médios das variações dimensionais lineares registadas na 1ª série de provetes.

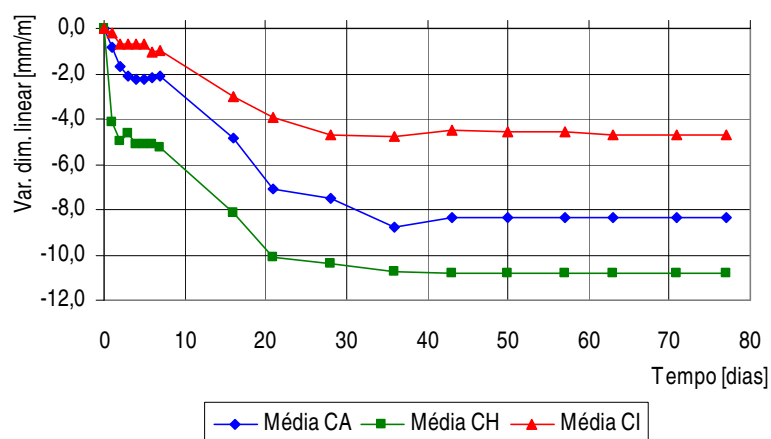
Por falta de fiabilidade nos resultados obtidos na 2ª série de provetes (devido a erros de leitura associados ao processo de medição utilizado, descrito no ponto 3.6.2) decidiu-se não se apresentar o gráfico correspondente aos valores da 2ª série.



- Em cima: provetes moldados; em baixo: provetes desmoldados

Fig. 3.25 – Medição da variação dimensional linear dos provetes

Desta forma foi possível acompanhar a retracção dos provetes desde a moldagem e não só após a desmoldagem, como acontece frequentemente.



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.26 – Variações dimensionais lineares dos provetes da 1ª série

Nas argamassas hidráulicas, a água é também consumida para a hidratação dos ligantes hidráulicos enquanto que na argamassa de cal aérea, a água só é evaporada ou sugada pelo suporte. No caso de provetes em molde metálico, não há sucção pelo suporte, ocorrendo uma retracção elevada por parte da argamassa de cal aérea, por evaporação de toda a água da argamassa.

Tendo em consideração a quantidade de água de amassadura utilizada em cada composição de argamassa, a maior quantidade utilizada pela argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea pode justificar o facto desta ter tido uma maior retracção do que as outras argamassas, e que, para a mesma quantidade de água de amassadura utilizada (caso das argamassas CA e CI), a argamassa de cal aérea tenha tido uma maior retracção do que a argamassa bastarda de cimento e cal aérea, devido ao que foi referido. No entanto, a influência de água em cada tipo de argamassa com diferentes tipos de ligante é decerto diferente.

#### **– Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta**

A massa volúmica real e a massa volúmica aparente são características físicas que ajudam na interpretação de algumas características mecânicas, como por exemplo, o módulo de elasticidade dinâmico e as resistências mecânicas. Quanto maior a massa volúmica, maior o módulo de elasticidade e maior será a compacidade e, por sua vez, menor a porosidade (a porosidade (P) e a compacidade (C) são grandezas complementares:  $P+C=100\%$ ).

O ensaio de determinação da porosidade aberta permite, como o nome diz, avaliar a porosidade aberta das argamassas, isto é, saber a percentagem de volume de poros presentes no interior da argamassa que têm ligação ao exterior e ligação com os outros poros. A porosidade aberta influencia o comportamento das argamassas, principalmente as suas resistências mecânicas e os principais mecanismos de degradação física a que estão sujeitas. Por isso, o conhecimento desta característica física é importante para avaliar a sua durabilidade [33].

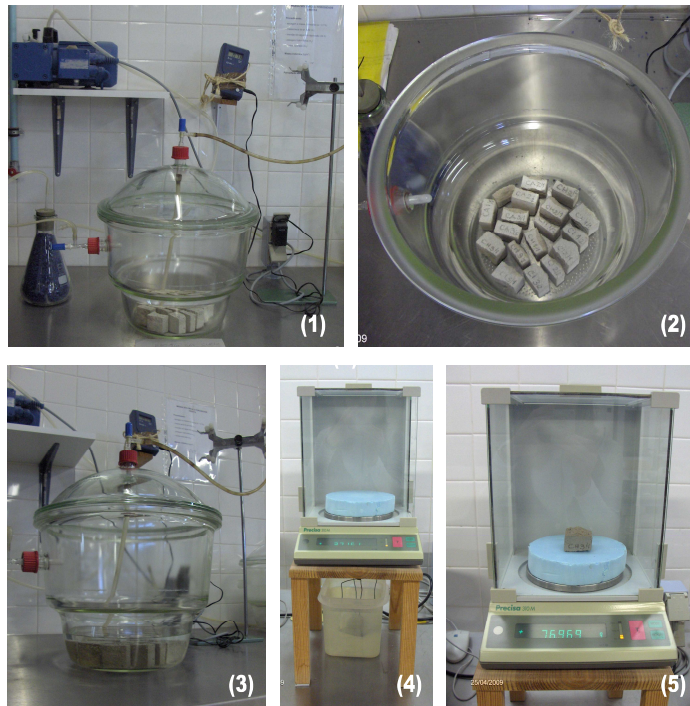
O ensaio para determinação de massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta foi realizado aos 90 dias (1ª série) e aos 163 dias de idade (2ª série) dos provetes após a moldagem, e de acordo com as fichas de ensaio Fe 01 [46] e Fe 02 [47].

O procedimento de ensaio seguido foi o mesmo para os três ensaios, diferindo apenas no tratamento dos dados obtidos (massas resultantes de três pesagens), conforme se indica nas expressões 3.9 a 3.11.

Nestes ensaios foram utilizadas as extremidades resultantes dos meios prismas ensaiados à compressão, denominadas de 1 e 2, cujos equipamentos e procedimento se referem em seguida [46, 47], fig. 3.27.

- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - balança com precisão de 0,001 g;
  - exsicador;
  - bomba de vácuo ligada a exsicador e a recipiente com sílica gel;
  - funil de vidro;
  - recipiente com sílica gel;
  - mangueiras de plástico.
  
- Procedimento de ensaio:
  - i) secagem dos provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
  - ii) pesagem dos provetes secos: massa  $M_0$ ;
  - iii) colocação dos provetes dentro do exsicador fechado provocando uma depressão gradual até 2667 Pa, com o auxílio da bomba de vácuo e mantendo-os assim durante 24 h;
  - iv) colocação de água no exsicador, lentamente e a uma temperatura de 15 a  $20^{\circ}\text{C}$ , até à imersão total dos provetes, durante cerca de 15 min (nesta operação, a bomba de vácuo continua ligada, sendo a água introduzida através de uma mangueira de PVC que entra na abertura própria da tampa do exsicador); a imersão total dos provetes à pressão referida é mantida durante 24 h;
  - v) ao fim das 24 h, desliga-se a bomba de vácuo e retira-se a tampa do exsicador, deixando os provetes durante mais 24 h dentro de água e à pressão atmosférica normal;
  - vi) pesagem dos provetes em imersão (pesagem hidrostática), obtendo-se a massa  $M_1$ ;
  - vii) retiram-se os provetes da água, absorve-se a água em excesso com um pano húmido e determina-se a massa  $M_2$  dos provetes saturados (pesagem saturada).

Durante a parte inicial deste ensaio, o ambiente no interior do exsicador é sujeito à acção de uma bomba de vácuo que, por sucção, retira o ar presente no interior dos poros dos provetes de argamassa. Deste modo, aquando a introdução de água no interior do exsicador, esta penetra mais facilmente nos poros dos provetes, pois existe uma menor pressão, criada pelo vácuo. Este procedimento permite obter valores de porosidade mais precisos do que aqueles que seriam fornecidos pela simples imersão dos provetes em água, além de tornar o ensaio mais rápido [33].



1 – equipamentos de ensaio utilizados; 2 – vista dos provetes dentro do exsiccador;  
3 – imersão total dos provetes dentro do exsiccador; 4 – pesagem hidrostática; 5 – pesagem saturada

Fig. 3.27 – Ensaio de determinação das massa volúmicas real, aparente e porosidade aberta

Os resultados da massa volúmica real (MVR), da massa volúmica aparente (MVA) e da porosidade aberta (PA), são obtidos de acordo com as expressões apresentadas seguidamente:

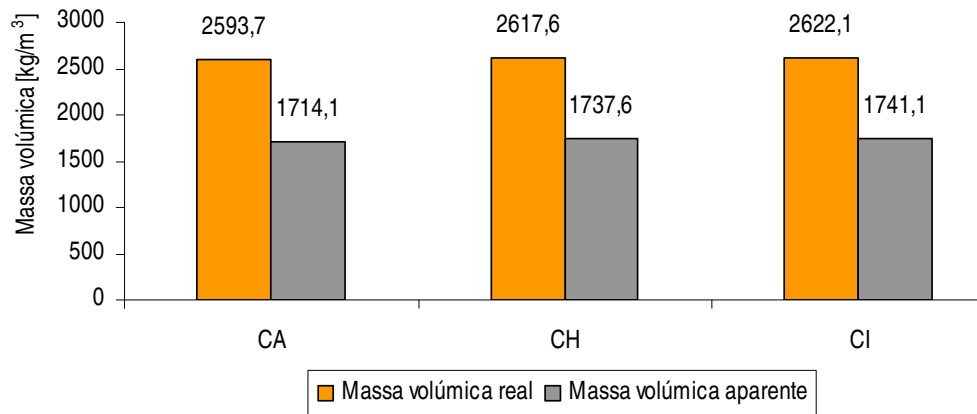
- massa volúmica real: 
$$\frac{M_0}{M_0 - M_1} \times 10^3 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.9)$$

- massa volúmica aparente: 
$$\frac{M_0}{M_2 - M_1} \times 10^3 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.10)$$

- porosidade aberta: 
$$\frac{M_2 - M_0}{M_2 - M_1} \times 100 \quad [\%] \quad (3.11)$$

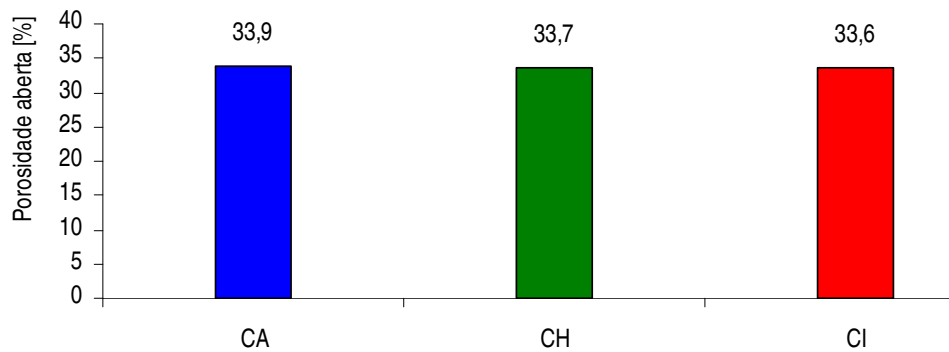
sendo:  $M_0$  a massa dos provetes secos [g];  $M_1$  a massa correspondente à pesagem hidrostática [g];  $M_2$  a massa correspondente à pesagem saturada [g].

Nas figs. 3.28 a 3.31 encontram-se os resultados médios de cada tipo de argamassa. Nas tabelas I.18 e I.19 do Anexo I referem-se os resultados obtidos para cada provete ensaiado das duas séries.



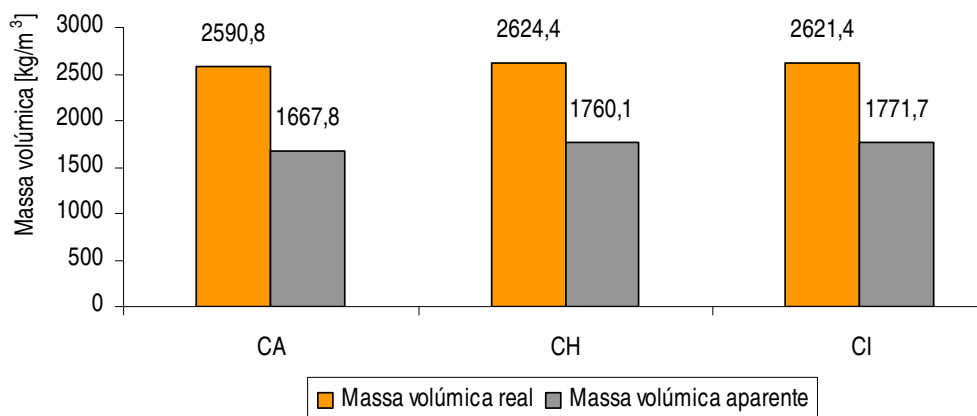
<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.28 – Valores médios das massas volúmicas real e aparente dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 90 dias de idade



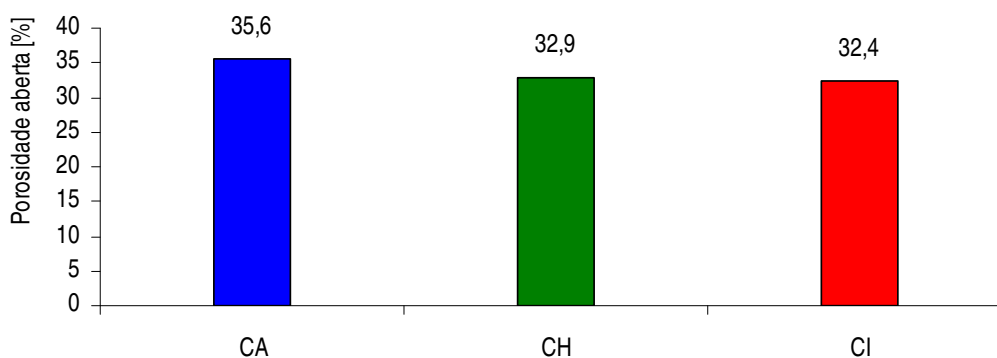
<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.29 – Valores médios da porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 90 dias de idade



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.30 – Valores médios das massas volúmicas real e aparente dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.31 – Valores médios da porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

Pelos resultados obtidos, parecem ter ocorrido alguns problemas com a determinação da porosidade aberta na 1ª série (em que foram obtidos valores muito semelhantes).

Os resultados da 2ª série já surgem mais diferenciados. As argamassas de cal aérea e bastarda de cimento e cal aérea registaram valores expectáveis de porosidade aberta e que explicam parcialmente as respectivas resistências mecânicas. As baixas resistências mecânicas da argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea não são explicáveis a partir do valor de porosidade aberta registado.

Em termos de compatibilidade entre as argamassas estudadas e a alvenaria “ordinária”, é importante que a argamassa a aplicar na solução de reforço da parede, tenha uma porosidade semelhante (não muito superior). Assim, pelo gráfico pode-se admitir alguma compatibilidade entre a argamassa bastarda de cimento e cal aérea e a alvenaria “ordinária”, em termos de porosidade aberta.

### – Absorção de água por capilaridade

As argamassas são materiais porosos e, por isso, têm a capacidade de absorver líquidos. A absorção de água pode fazer-se por duas maneiras: devido à pressão hidráulica associada à imersão total ou por capilaridade.

A absorção de água devido à pressão hidráulica dá-se quando as argamassas estão totalmente imersas, sendo a absorção feita através das várias faces do provete devido à pressão que a água exerce para ocupar o espaço preenchido por ar.

A absorção por capilaridade dá-se quando predominantemente uma das faces da argamassa está em contacto com a água, dando-se o fenómeno de sucção capilar.

O ensaio de absorção de água por capilaridade avalia o comportamento das argamassas relativamente à sua capacidade de absorver água através dos capilares e permite analisar a rapidez de absorção de água ao longo do tempo, até atingir o seu ponto de absorção máximo. Ao atingir esse ponto é possível



saber a quantidade de água que acumula no seu interior através do “valor assintótico” de absorção de água por capilaridade.

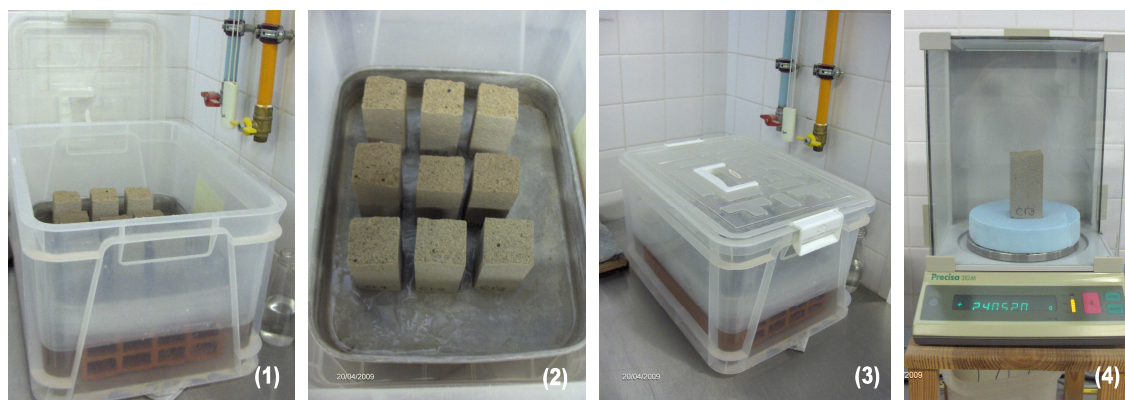
O comportamento de uma argamassa à acção da capilaridade depende principalmente das características da sua estrutura porosa, isto é, da quantidade, dimensão e conectividade dos poros [41]. Este ensaio constitui um indicador importante no que se refere a mecanismos de degradação devido a ciclos de gelo/degelo. Com efeito, as argamassas com menores coeficientes de absorção e menores valores assintóticos estão mais protegidas deste tipo de degradação porque é menor a quantidade de água absorvida e que pode congelar no seio da argamassa, aumentando de volume e há, eventualmente, mais espaço para um aumento de volume associado à formação de gelo (poros com dimensão superior à dos capilares) [33, 35].

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado aos 90 dias de idade dos provetes após a moldagem (1ª série), de acordo com a ficha de ensaio Fe 06 [48].

Nestes ensaios foi utilizada uma das metades dos prismas ensaiados à tracção por flexão.

De seguida sintetizam-se os equipamentos utilizados e o procedimento seguido [48], fig.3.32.

- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - tabuleiro de material rígido e não absorvente;
  - balança com precisão de 0,001g;
  - cronómetro.
- Procedimento de ensaio:
  - i) secagem dos provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
  - ii) pesagem dos provetes secos, obtendo-se a massa  $M_0$ ;
  - iii) colocação do tabuleiro dentro de uma caixa plástica com tampa, com uma altura de água de cerca de 10 cm (onde tinham previamente sido criadas condições de saturação), assente em apoios estáveis que impeçam a entrada de água para o seu interior e garantam a horizontalidade;
  - iv) colocação de papel absorvente no fundo do tabuleiro, ainda seco;
  - v) criação de uma lâmina de água no interior do tabuleiro de forma a que, depois de concluída a colocação dos provetes, esta se mantenha a uma altura de 2 mm;
  - vi) colocação dos provetes de forma a que a face de 4cmx4cm em contacto com a água seja a face plana;
  - vii) colocação da tampa da caixa logo após a colocação do último provete;
  - viii) pesagem de cada provete,  $M_i$ , após 5, 15, 30, 60, 180, 360 min e de 24 em 24 h, até atingir massa constante.



1 – vista geral do ensaio; 2 – vista dos provetes dentro da caixa; 3 – ensaio a decorrer; 4 – pesagem do provete

Fig. 3.32 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

Os resultados são obtidos pela determinação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície, até ao instante  $t$  ( $M_t$ ), de acordo com a seguinte expressão [48]:

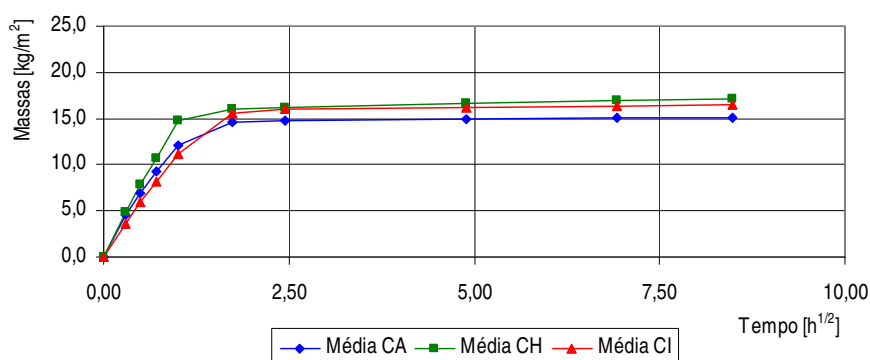
$$M_t = \frac{M_0 - M_1}{A} \times 10^{-3} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (3.12)$$

sendo:  $M_t$  a massa do provete no instante  $t$  [g];  $M_0$  a massa do provete seco [g];  $A$  a área da base do provete em contacto com a água [ $\text{m}^2$ ] (neste caso,  $A=0,04 \times 0,04=0,0016 \text{ m}^2$ ).

Com os valores obtidos, traça-se o gráfico correspondente à absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, até massa constante, com abcissas em  $t$  [ $\text{h}^{1/2}$ ] e ordenadas em  $\text{kg/m}^2$ . A inclinação do troço inicial do gráfico define o “coeficiente de absorção de água por capilaridade” em [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ ] e a assíntota horizontal do gráfico define o “valor assintótico”, em  $\text{kg/m}^2$ . O coeficiente de absorção permite conhecer a velocidade com que a água é inicialmente absorvida pelo material e, o valor assintótico corresponde à quantidade máxima de água absorvida [41].

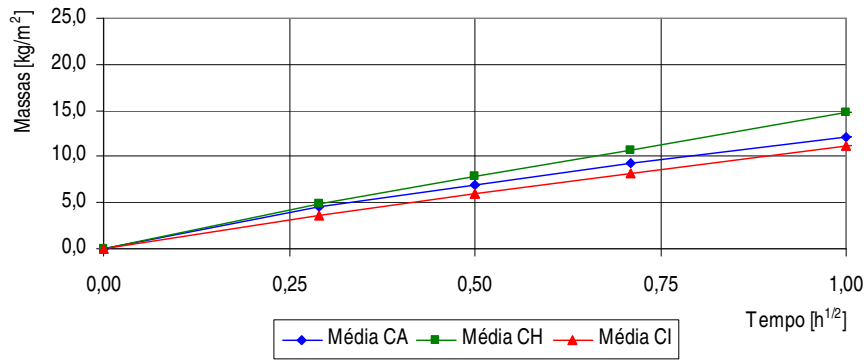
Na fig. 3.33 apresentam-se os valores médios de absorção de água por capilaridade e na fig. 3.34 o gráfico correspondente à primeira hora de ensaio.

No Anexo I, nas tabelas I.20 a I.25 apresentam-se os valores obtidos em cada provete de argamassa.



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

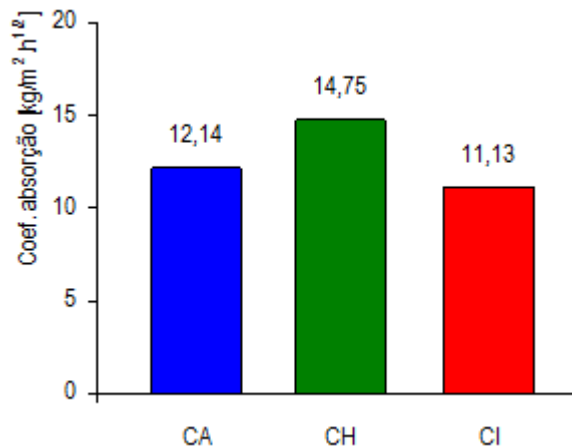
Fig. 3.33 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

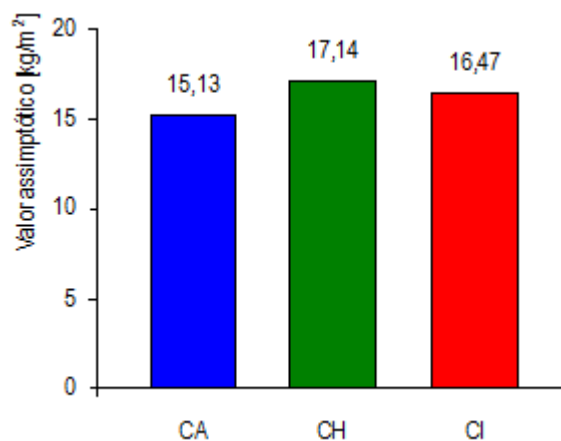
Fig. 3.34 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio

Verifica-se que o troço inicial do gráfico é aproximadamente constante até à primeira hora de ensaio; logo, o coeficiente de absorção de água por capilaridade corresponderá a esse tempo de ensaio. De seguida, nas figs. 3.35 e 3.36, apresentam-se, respectivamente, os resultados médios do coeficiente de absorção de água e do valor assintótico para cada uma das argamassas estudadas.



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.35 – Resultados médios do coeficiente de absorção de água (1ª série)



1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.36 – Resultados médios do valor assintótico (1ª série)

A argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea distingue-se pela negativa do ponto de vista da capilaridade, com os piores valores de coeficiente de absorção capilar e de valor assintótico.

No caso da argamassa de cal aérea, enquanto que esta apresenta um valor de coeficiente capilar superior ao da bastarda de cimento e cal aérea, apresenta também um valor assintótico inferior comparativamente a essa argamassa. Pelo contrário, a argamassa bastarda de cimento e cal aérea absorve água por capilaridade mais lentamente, mas a quantidade total de água absorvida é superior. No entanto, o comportamento não é muito distinto particularmente entre estas duas argamassas referidas.

Pelo gráfico pode-se observar que os valores assintóticos obtidos pelas argamassas de cal aérea e bastarda de cimento e cal aérea são próximos, o que permite admitir, em termos de absorção de água por capilaridade, compatibilidade entre a argamassa bastarda de cimento e cal aérea e a alvenaria ordinária.

É de salientar, no entanto, que esta característica (valor assintótico) apenas pode ser comparada em ensaios homólogos, quando se utilizam provetes inteiros, porque só nestas condições o volume total dos provetes, susceptível de ser preenchido com água, é igual (constante).

### **– Ensaio de secagem**

Um dos aspectos importantes na avaliação do comportamento das argamassas é a secagem, pois é um indicador da durabilidade do suporte. O resultado deste ensaio é um parâmetro importante para a avaliação do comportamento das argamassas, nomeadamente, a sua capacidade de evaporação de água (podendo esta ter origem na capilaridade, infiltração ou condensação). Este parâmetro tem também influência no comportamento térmico das paredes, pois quanto mais húmida esta estiver, maior será a sua condutibilidade térmica.

A secagem de uma argamassa está relacionada com os seus valores de porosidade aberta e com condições de temperatura e ventilação ambiente [33].

Alguns autores utilizam o ensaio de permeabilidade ao vapor de água com intuíto semelhantes ao ensaio de secagem. De certo modo, este ensaio permite “substituir” o ensaio de permeabilidade ao vapor de água de argamassas, o qual permite avaliar a maior ou menor capacidade de uma argamassa para se deixar atravessar pelo vapor de água.

O ensaio de secagem foi realizado aos 108 dias de idade dos provetes após a moldagem (1ª série), com base na dissertação de Mestrado de T. Pereira [33] que teve como referências algumas indicações da ficha de ensaio Fe 07 [49], um documento sobre absorção e secagem de água de E. Charola [7] e a tese de Doutoramento de A. Pinto [40].

Nestes ensaios foram utilizados os meios prismas ensaiados à flexão com que anteriormente se realizou o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Durante este ensaio registou-se a temperatura e humidade relativa do laboratório do DEC/FCT onde se realizou o ensaio, indicando-se no gráfico da fig. 3.37 os resultados obtidos.

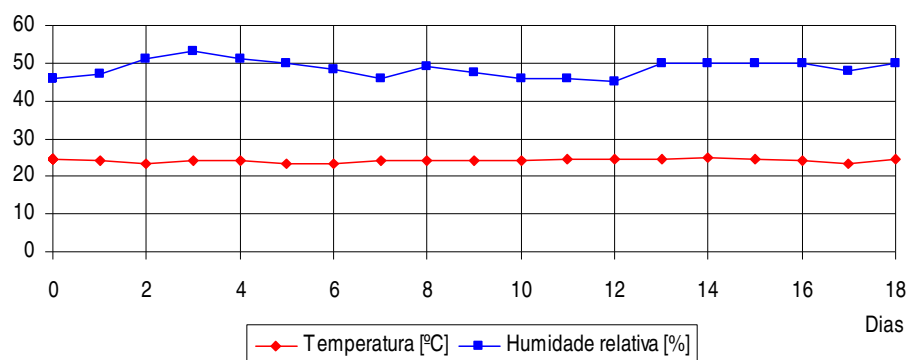
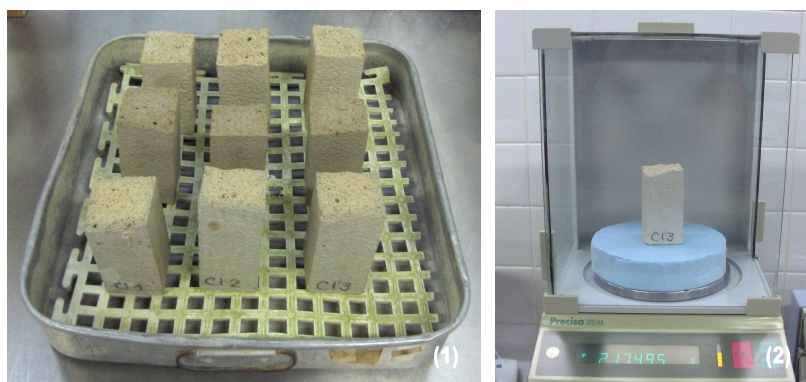


Fig. 3.37 – Evolução da temperatura e humidade relativa do laboratório 1.16, durante o ensaio de secagem das argamassas

Em seguida referem-se os equipamentos e o procedimento do ensaio de secagem, fig. 3.38.

- Equipamentos de ensaio:
  - tabuleiro de material não absorvente;
  - balança com precisão de 0,001g;
  - termo-higrómetro;
  - cronómetro.
- Procedimento de ensaio:
  - i) pesagem dos provetes saturados,  $M_s$ , imediatamente após a conclusão do ensaio de absorção de água por capilaridade;
  - ii) colocação dos provetes no tabuleiro com rede de borracha para promover a evaporação também pela face inferior;
  - iii) pesagem de cada provete,  $M_i$ , após 5, 15, 30, 60, 180, 300, 360 min e de 24 em 24h, até atingir massa constante<sup>17)</sup>.

<sup>17)</sup> No ensaio de secagem a “massa constante” de um provete é atingida quando a variação entre duas pesagens intervaladas de 24 horas é menor ou igual a 0,01% da massa do provete [49].



1 – vista geral do ensaio; 2 – pesagem do provete de argamassa

Fig. 3.38 – Ensaio de secagem dos provetes de argamassa

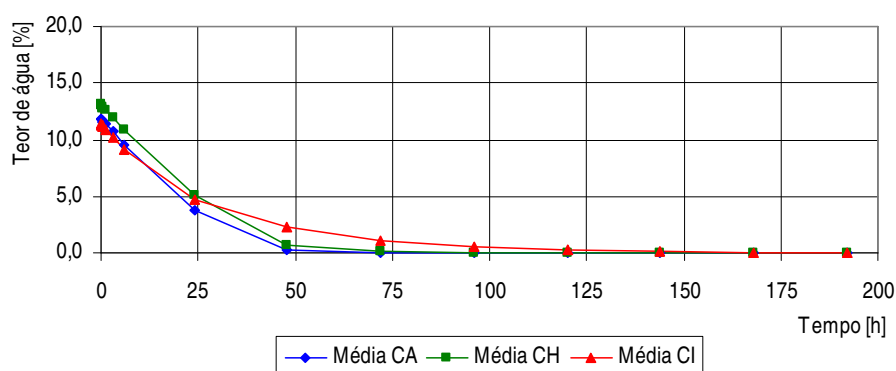
Os resultados são obtidos através das medições diárias da massa dos provetes, com as quais se procede à elaboração de curvas de evaporação, ou curvas de secagem, que expressam a evolução do teor de água dos provetes ( $Q_i$ ) ao longo do tempo, em horas. Os resultados são dados através da seguinte expressão [49]:

$$Q_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \quad [\%] \quad (3.13)$$

sendo:  $M_i$  a massa do provete no instante  $t_i$  [g];  $M_0$  a massa do provete seco [g].

Na fig. 3.39 apresentam-se os resultados médios do ensaio de secagem.

No Anexo I, nas tabelas I.26, I.28 e I.30, apresentam-se os resultados individuais do ensaio de secagem obtidos em cada provete de argamassa.



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.39 – Resultados médios do ensaio de secagem dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 108 dias de idade

A caracterização da secagem, isto é, conhecer a rapidez de secagem das argamassas, faz-se através da determinação do índice de secagem (IS), que é dado pela seguinte expressão [5]:

$$IS = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(Q_i) \times dt}{Q_{\text{máx}} \times t_f} \quad (3.14)$$

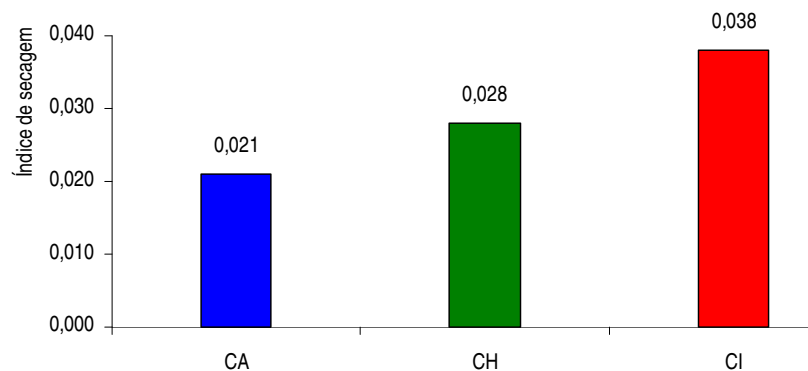
sendo:  $f(Q_i)$  quantidade de água no interior do provete [%] em função do tempo, relativamente à massa seca;  $Q_{\text{máx}}$  a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca;  $t_f$  o tempo final do ensaio [h].

O cálculo do integral foi efectuado através da seguinte expressão [5]:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=ns} \left[ (t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{\text{máx}} \times t_f} \quad (3.15)$$

sendo:  $Q_i$  a quantidade de água no interior do provete no instante  $i$  [%], relativamente à massa seca;  $Q_{\text{máx}}$  a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca;  $t_f$  o tempo final de ensaio [h];  $t_i$  o tempo de ensaio  $i$  [h];  $n_s$  o número de pesagens de controlo efectuadas.

Na fig. 3.40 apresentam-se os resultados médios do índice de secagem obtido para cada tipo de argamassa.



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 3.40 – Resultados médios do índice de secagem dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 108 dias de idade

A argamassa de cal aérea apresenta um menor índice de secagem, em relação à argamassa bastarda de cimento e cal aérea, que apresenta o valor mais elevado.

Um menor índice de secagem traduz uma maior facilidade de secagem da humidade existente. Dessa forma, sendo a alvenaria “ordinária” constituída por argamassa de cal aérea e pedra, é admissível

considerar que a pedra utilizada possa contribuir para um aumento do índice de secagem da alvenaria, relativamente ao valor registado só pela argamassa.

Enquanto que os valores registados pelas argamassas de cal aérea e bastarda de cal hidráulica e cal aérea parecem compatíveis, a diferença registada pelo índice de secagem apresentado pela argamassa bastarda de cimento e cal aérea deverá ser analisado com particular cuidado, uma vez que há que garantir que essas argamassas aplicadas à superfície da parede, não conduzam à concentração de humidade.

### **– Porosimetria por intrusão de mercúrio**

Este ensaio não foi realizado. Optou-se, no entanto, por apresentar genericamente as condições de ensaio e as características que poderiam ter sido obtidas.

Sabe-se que a porosidade aberta influencia tanto a absorção de água por capilaridade como a secagem, pois é através dos poros que o transporte de água e vapor ocorrem, bem como a ligação com o exterior. Para além do estudo desta característica, é também importante analisar a dimensão e conexão dos poros – porometria.

A porosimetria de mercúrio baseia-se no princípio físico que determina que a pressão necessária para provocar a intrusão de um líquido não molhante<sup>18)</sup> num capilar de secção circular é inversamente proporcional ao diâmetro do capilar e directamente proporcional à tensão superficial do líquido (referente ao interface líquido-gás) e ao ângulo de contacto do líquido (sendo que a superfície sólida é a que delimita o capilar) [41].

O mercúrio é o líquido de intrusão mais frequentemente utilizado porque constitui um líquido que é não molhante em relação à maior parte dos materiais sólidos [41].

A determinação da distribuição do volume de poros abertos através do porosímetro de mercúrio, fig. 3.41, consiste no enchimento dos poros da amostra com mercúrio sob pressão [40].

A determinação do diâmetro  $D$  de um conjunto de poros através da porosimetria de mercúrio é expressa por [41]:

---

<sup>18)</sup> Define-se *molhabilidade* à interacção molecular que ocorre entre dois fluidos (líquido e vapor, por exemplo) e um substrato sólido. Quando o líquido e o vapor estão em contacto, juntamente com a superfície sólida, observa-se a existência de uma linha comum para as três fases - linha de contacto. Essa configuração origina a definição do ângulo de contacto  $\theta$ , como sendo o ângulo resultante entre a linha tangente à interface que separa o líquido e o vapor e a linha paralela à superfície do sólido. O ângulo de contacto representa um papel fundamental em fenómenos capilares (quando um tubo capilar fino é colocado em contacto com uma superfície líquida, por exemplo). Neste caso, se  $\theta < 90^\circ$  (por exemplo, sistema ar-água-vidro), o líquido entra no capilar até que a força capilar seja equilibrada pelo peso da coluna líquida formada com a invasão. Diz-se então que o líquido é molhante para aquele sólido. Porém, se  $\theta > 90^\circ$  (por exemplo, sistema ar-mercúrio-vidro), observa-se que o líquido é repelido pelo capilar, originando uma depressão na superfície líquida. Diz-se então que o líquido é não-molhante para aquele sólido. Quando  $\theta=90^\circ$ , as forças capilares são nulas e nada ocorre [63].



$$D = \frac{-4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{P} \quad [\text{m}] \quad (3.16)$$

sendo: D o diâmetro dos poros [m];  $\sigma$  a tensão superficial do mercúrio [N/m];  $\theta$  o ângulo de contacto entre o mercúrio e as paredes dos poros [°]; P a pressão exercida [Pa].

O valor que se atribui ao ângulo de contacto do mercúrio tem uma influência directa no cálculo do diâmetro dos poros a partir da pressão de intrusão. O método mais comum para determinação do ângulo de contacto de um lote de mercúrio com determinado material utiliza um angulómetro de mercúrio. O processo baseia-se na intrusão de mercúrio num orifício de dimensões conhecidas feito no provete. Através do registo da pressão à qual se deu a intrusão, é possível a determinação do ângulo de contacto pela aplicação da equação 3.16. É corrente a utilização de valores entre 130° e 140°, verificando-se pela análise daquela expressão, que o erro associado à utilização deste valores varia de 17% a 25% no valor do diâmetro calculado, de acordo com a pressão considerada [41].

O provete a ensaiar é colocado na cápsula de um penetrómetro, fig. 3.41, após a secagem e degasificação. O ensaio é iniciado por uma redução significativa da pressão no penetrómetro, seguindo-se a intrusão da quantidade de mercúrio necessária para o preenchimento da cápsula e da haste do penetrómetro, circundando o provete [41].



Fig. 3.41 – Porosímetro de mercúrio e penetrómetro preparados para o início do ensaio [41]

O equipamento inicia então o processo de aumento gradual de pressão que provoca a intrusão de mercúrio na estrutura porosa do provete, geralmente por patamares pré-definidos.

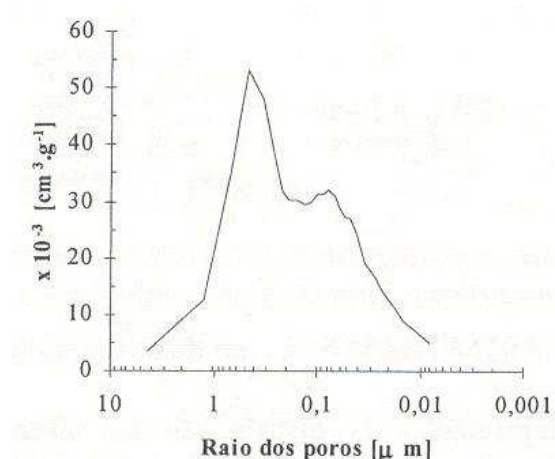
Este processo é separado em duas fases. A primeira corresponde a uma pressão máxima ligeiramente superior à pressão atmosférica. A segunda fase corresponde à pressão máxima indicada pelo operador. Após se atingir o valor máximo, a pressão desce por patamares até à pressão atmosférica, o que se designa por extrusão. Um programa informático regista a série de pares de valores patamar de pressão / volume de mercúrio introduzido (ou extrudido). Considerando que o volume de mercúrio que

penetra no provete corresponde ao volume de poros acessíveis, os dados registados podem ser tratados de forma a obter-se o conjunto de volumes de poros que têm um determinado diâmetro, através da aplicação da expressão 3.16 [41].

O equipamento mede a quantidade de mercúrio injectado (igual ao volume de poros) para cada patamar de pressão (equivalente ao raio de poros preenchidos), sendo possível obter [40]:

- $P_{Hg}$  – porosidade aberta, determinada por mercúrio [%];
- $\gamma_{real\ Hg}$  – massa volúmica aparente, determinada por mercúrio [ $kg.m^{-3}$ ];
- o volume de mercúrio intrudido, por grama de material;
- a distribuição do volume de poros, em função do raio dos poros.

É usual a apresentação de gráficos que representam o volume de mercúrio em ordenadas e a dimensão dos poros em abcissas [41], fig. 3.42.



3.42 – Exemplo de curva de porometria [40]

### 3.6.3 – Características químicas

#### – Profundidade de carbonatação

O ensaio de determinação da profundidade de carbonatação (tabela 3.8) foi realizado nos provetes de argamassa de cal aérea e areia, CA7 e CA8, de acordo com a ficha de ensaio Fe 28 [55].

Com este ensaio pode-se interpretar a evolução do endurecimento da argamassa ao longo do tempo, do exterior para o interior, à medida que a reacção com o dióxido de carbono vai evoluindo (expressão 3.3).

Na fig. 3.43 representa-se esquematicamente a diminuição da área do núcleo interior não carbonatado de um provete prismático de argamassa, ao longo do tempo, em consequência da reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono do ar, de acordo com a equação química da carbonatação da cal, indicada na expressão 3.3 [35].

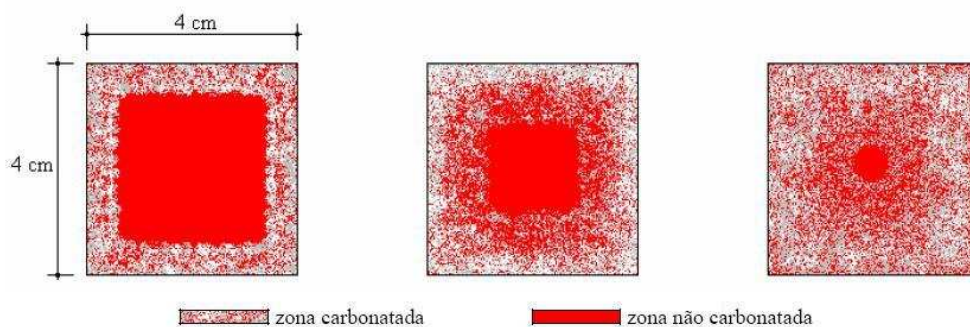
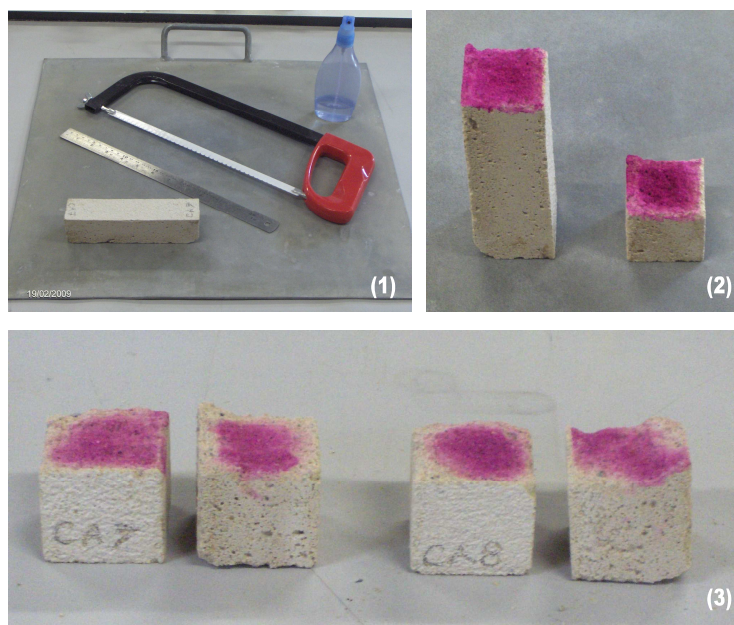


Fig. 3.43 – Representação esquemática da evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo em provetes prismáticos de argamassa com 16cmx4cmx4cm [35]

O ensaio, fig. 3.44, foi efectuado recorrendo aos equipamentos e procedimento de ensaio [55] que a seguir se apresentam.

- Equipamentos de ensaio:
  - serrote para corte de provetes;
  - régua metálica;
  - solução alcoólica de fenolftaleína<sup>19)</sup>.
- Procedimento de ensaio:
  - i) pesagem dos provetes;
  - ii) corte dos prismas de argamassa segundo secções paralelas às bases de 4cmx4cm;
  - iii) colocação da solução de fenolftaleína na zona de corte, com observação da cor resultante da superfície; a cor rosa ou púrpura indica a presença de zonas alcalinas (não carbonatadas) enquanto que a não alteração de cor, indica zonas neutras ou ácidas (já carbonatadas);
  - iv) corte de cada provete três vezes (aos 30, 60 e 90 dias de idade do provete), com afastamentos de 4 cm cada.

<sup>19)</sup> A solução alcoólica de fenolftaleína é um indicador ácido-base utilizado frequentemente em titulações. Mantém-se incolor em soluções ácidas ou neutras e cor-de-rosa ou púrpura em soluções básicas [61].



1 – equipamento utilizado para este ensaio; 2 – ensaio aos 30 dias de idade; 3 – ensaio aos 90 dias de idade

Fig. 3.44 – Ensaio de determinação da profundidade de carbonatação

Os resultados obtêm-se através da medição, com uma régua, dos quatro “bordos” do provete, de acordo com a fig. 3.45.

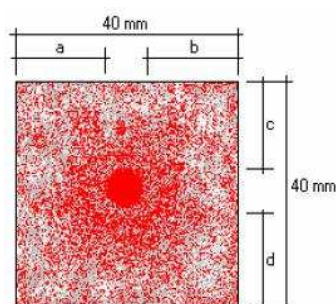


Fig. 3.45 – Representação esquemática da secção transversal dos provetes prismáticos de argamassa para o traçado dos gráficos de profundidade de carbonatação [35]

No gráfico da fig. 3.46 representam-se os valores correspondentes à média das leituras das quatro faces dos provetes de argamassa CA7 e CA8, realizadas aos 30, 63 e 90 dias de idade.

No Anexo I, na tabela I.32, apresentam-se os resultados do ensaio de profundidade de carbonatação.

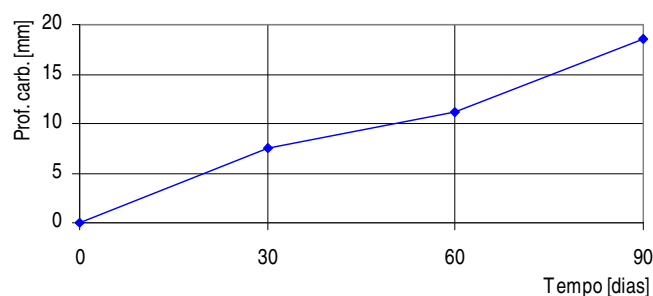


Fig. 3.46 – Profundidade de carbonatação dos provetes de argamassa CA7 e CA8 aos 30, 63 e 90 dias

### 3.7 – Enquadramento dos resultados

Nesta secção enquadram-se e comparam-se os valores obtidos neste Capítulo com os obtidos por outros autores (Capítulo II), com o objectivo de os poder extrapolar ao trabalho de investigação [35] que serviu de referência ao presente trabalho.

Para este efeito, são recuperados os diversos resultados referidos no Capítulo II que serviram de comparação aos valores obtidos na presente dissertação, no que diz respeito aos ensaios de caracterização das três argamassas estudadas: argamassa de cal aérea e areia (CA), ao traço volumétrico 1:3; argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia (CH), ao traço volumétrico 1:1:6 e argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia (CI), ao traço volumétrico 1:1:6.

Nas tabelas 3.9 a 3.11 indicam-se valores directamente comparáveis com os obtidos na presente dissertação, com vista à comparação entre características dos constituintes das argamassas em pasta e endurecidas.

Após a apresentação destas tabelas, e com vista a uma melhor comparação dos resultados, apresentam-se diversos gráficos, figs. 3.47 a 3.53, relacionando características comparáveis, para cada uma das três argamassas em estudo (CA, CH e CI). Estes gráficos permitem comparar características homólogas, obtidas por vários autores e, ao mesmo tempo, relacionar diferentes características entre si. A relação entre estas diferentes características é feita, tendo em conta algumas “condicionantes de ensaio”, tais como, por exemplo: (i) alguns resultados de características homólogas terem sido obtidas em idades diferentes; (ii) diferentes autores terem utilizado diferentes equipamentos; (iii) os ensaios terem sido executados por técnicos (pessoas) diferentes; (iv) o grau de compactação ser, por vezes, distinto; (v) a superfície específica e outras características intrínsecas (de agregados e/ou ligantes) ser diferente; (vi) por vezes terem sido seguidas disposições de ensaio distintas; (vii) no principal trabalho de referência a esta dissertação [35] se terem efectuado as amassaduras em “ambiente de obra”.

Estas condicionantes poderão, em alguns casos, ter interferido com a relação entre as diversas características estudadas face ao actual estado do conhecimento.

A comparação das diversas características foi feita tendo como critério comum a comparação entre os valores de F. Pinho [35] e a 1ª série de provetes de C. Barreto. Com vista à análise não ser demasiado extensiva, além desta é apenas efectuada mais uma ou duas comparações.

Para além do referido, e por simplificação, a análise é realizada entre duas características, desprezando as restantes.

Tabela 3.9 – Comparação das características dos provetes de argamassa de cal aérea e areia

Autor	Material	Idade [dias]	Características														
			Físicas											Mecânicas			Quím
			D [mm]	d [mm]	Mf	Ba [kg/m³]	Esp. [%]	MVR [kg/m³]	MVA [kg/m³]	PA [%]	C. Cap [kg/m²·h <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m²]	IS	E <sub>din</sub> [MPa]	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	
F. Pinho [35]	Areia rio		2,38	0,149	2,7	1584,4											
	Areia areeiro		0,595	0,149	1,8	1527,3											
	Cal aérea					•											
	Arg. pasta						81										
	Arg. end.	90						2590,1	1742,9	32,7	17,4	19,7	•	2310	0,3	0,65	14,6
P. Faria [13]	Areia rio		2,38	0,297	2,7	1590											
	Cal aérea					570											
	Arg. pasta						74										
	Arg. end.	60						•	1720	34	22,2	18,1	•	2300	0,33	0,65	•
V. Rato [41]	Areia		2,36	0,500													
	Arg. pasta						65										
	Arg. end.	60							1705	34	18,36	<sup>1)</sup>	•	1793	0,23	0,48	•
C. Guerreiro [17]	Arg. pasta						65										
	Arg. end.	60						2604	1724	33,8	17,22	17,98	•	2350	0,28	0,69	•
	Arg. pasta						69										
	Arg. end.	120						2064	1761	32,4	15,3	17,37	•	2230	0,24	0,69	•
M. R. Veiga [57]	Arg. end	90						•	1900	•	19,2	•	•	4400	0,4	1,0	•
C. Barreto (1ª série)	Areia rio		2,38	0,149	2,5	1393,2											
	Areia areeiro		0,595	0,149	1,7	1372,8											
	Cal aérea					290,6											
	Arg. pasta						69										
	Arg. end.	<sup>2)</sup>						2593,7	1714,1	33,9	12,14	15,13	0,019	3193	0,2	0,8	18,5
C. Barreto (2ª série)	Areia rio		2,38	0,149	2,5	1393,2											
	Areia areeiro		0,595	0,149	1,7	1372,8											
	Cal aérea					290,6											
	Arg. pasta						69										
	Arg. end.	163						2590,8	1667,8	35,6	•	•	•	2454	0,3	0,5	•

<sup>1)</sup> Os valores de VA, apesar de terem sido calculados, não são apresentados porque o ensaio foi efectuado com provetes inteiros;<sup>2)</sup> Os ensaios de caracterização da argamassa endurecida dos provetes da 1ª série decorreram aos 83, 90 e 108 dias, razão pela qual não se indica a idade na tabela;<sup>3)</sup> • – ensaio não efectuado pelo autor

Tabela 3.10 – Comparação das características dos provetes de argamassa de cal hidráulica, cal aérea e areia

Autor	Material	Idade [dias]	Características													
			Físicas											Mecânicas		
			D [mm]	d [mm]	Mf	Ba [kg/m³]	Esp. [%]	MVR [kg/m³]	MVA [kg/m³]	PA [%]	C. Cap [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m²]	IS	E <sub>din</sub> [MPa]	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]
P. Faria [13]	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,297	2,7	1590										
	Cal hidráulica					1020										
	Cal aérea <sup>1)</sup>					570										
	Arg. pasta						73									
	Arg. end.	60						●	1841	31	19,8	20,1	●	1530	0,13	0,39
C. Barreto (1ª série)	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,149	2,5	1393,2										
	Areia areeiro <sup>1)</sup>		0,595	0,149	1,7	1372,8										
	Cal hidráulica					837,5										
	Cal aérea <sup>1)</sup>					290,6										
	Arg. pasta						65									
	Arg. end.	2)						2617,6	1737,6	33,7	14,75	17,14	0,021	1869	0,2	0,6
C. Barreto (2ª série)	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,149	2,5	1393,2										
	Areia areeiro <sup>1)</sup>		0,595	0,149	1,7	1372,8										
	Cal hidráulica					837,5										
	Cal aérea <sup>1)</sup>					290,6										
	Arg. pasta						65									
	Arg. end.	163						2624,4	1760,1	32,9	●	●	●	2066	0,2	0,7

<sup>1)</sup> Apesar da repetição destes valores, relativamente à tabela 3.9, considera-se importante voltar a referi-los para efeitos de comparação com os trabalhos de investigação referidos nesta tabela.

<sup>2)</sup> Os ensaios de caracterização da argamassa endurecida dos provetes da 1ª série decorrem aos 83, 90 e 108 dias, razão pela qual não se indica a idade na tabela.

<sup>3)</sup> • – ensaio não efectuado pelo autor

Tabela 3.11 – Comparação das características dos provetes de argamassa de cimento, cal aérea e areia

Autor	Material	Idade [dias]	Características														
			Físicas												Mecânicas		
			D [mm]	d [mm]	Mf	Ba [kg/m³]	Esp. [%]	MVR [kg/m³]	MVA [kg/m³]	PA [%]	C. Cap [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m²]	IS	E <sub>din</sub> [MPa]	R <sub>t</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	
F. Pinho [35]	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,149	2,7	1584,4											
	Areia areeiro <sup>1)</sup>		0,595	0,149	1,8	1527,3											
	Arg. end.	2)					●	2768	1875	32,2	13,6	3)	●	5637	1,22	4,55	
P. Faria [13]	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,297	2,7	1590											
	Cimento					1280											
	Cal aérea <sup>1)</sup>					570											
	Arg. pasta						67										
	Arg. end.	60						●	1841	31	15,0	20,9	●	7340	1,23	4,08	
V. Rato [41]	Areia																
	Arg. pasta						70										
	Arg. end.	60						●	1801	30	21,78	3)	●	5905	0,96	3,02	
F. Henriques e V. Rato [20]	Arg. end.							2615	1843	29,5	15,78	18,8	●	5600	1,06	3,79	
T. Pereira [33]	Areia rio					1445											
	Cimento					1045											
	Cal Aérea					361											
	Arg. pasta						75										
	Arg. end.	60						●	1827	30	18,0	3)	●	4935	1,05	4,89	
M. R. Veiga [57]	Arg. end.	90						●	1870	●	14,2	●	●	4770	0,8	2,9	
C. Barreto (1ª série)	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,149	2,5	1393,2											
	Areia areeiro <sup>1)</sup>		0,595	0,149	1,7	1372,8											
	Cimento					930,2											
	Cal aérea <sup>1)</sup>					290,6											
	Arg. pasta						78										
	Arg. end.	4)						2622,1	1741,1	33,6	11,13	16,47	0,013	4167	0,7	2,2	
C. Barreto (2ª série)	Areia rio <sup>1)</sup>		2,38	0,149	2,5	1393,2											
	Areia areeiro <sup>1)</sup>		0,595	0,149	1,7	1372,8											
	Cimento					930,2											
	Cal aérea <sup>1)</sup>					290,6											
	Arg. pasta						78										
	Arg. end.	163						2621,4	1771,7	32,4	●	●	●	4637	0,9	2,4	

<sup>1)</sup> Apesar da repetição destes valores, relativamente às tabelas 3.9 e 3.10, considera-se importante voltar a referi-los para efeitos de comparação com os trabalhos de investigação referidos nesta tabela.

<sup>2)</sup> Como referido na tabela 2.4 os ensaios de caracterização da argamassa bastarda endurecida foram efectuados em vários dias, logo a idade dos provetes não será aqui indicada.

<sup>3)</sup> Os valores de VA, apesar de terem sido calculados, não são apresentados porque o ensaio foi efectuado com provetes inteiros.

<sup>4)</sup> Os ensaios de caracterização da argamassa endurecida dos provetes da 1ª série decorreram aos 83, 90 e 108 dias, razão pela qual não se indica a idade na tabela.

<sup>5)</sup> • – ensaio não efectuado pelo autor



- **Baridade:**

A baridade dos materiais é um factor que tem grande influência desde logo em todas as características das argamassas. É com esta característica, a partir da qual se determinam os traços das argamassas. O facto de esta característica ser determinada com maior ou menor compactação, justifica a variação de valores, nomeadamente, no caso dos ligantes, entre os diferentes autores. No caso de P. Faria [13], os materiais foram compactados no recipiente de baridade, o que explica os valores obtidos terem sido mais elevados. No entanto, e uma vez que o método utilizado foi constante para todos os materiais, admite-se que o traço volumétrico tenha sido aproximadamente mantido.

- **Espalhamento:**

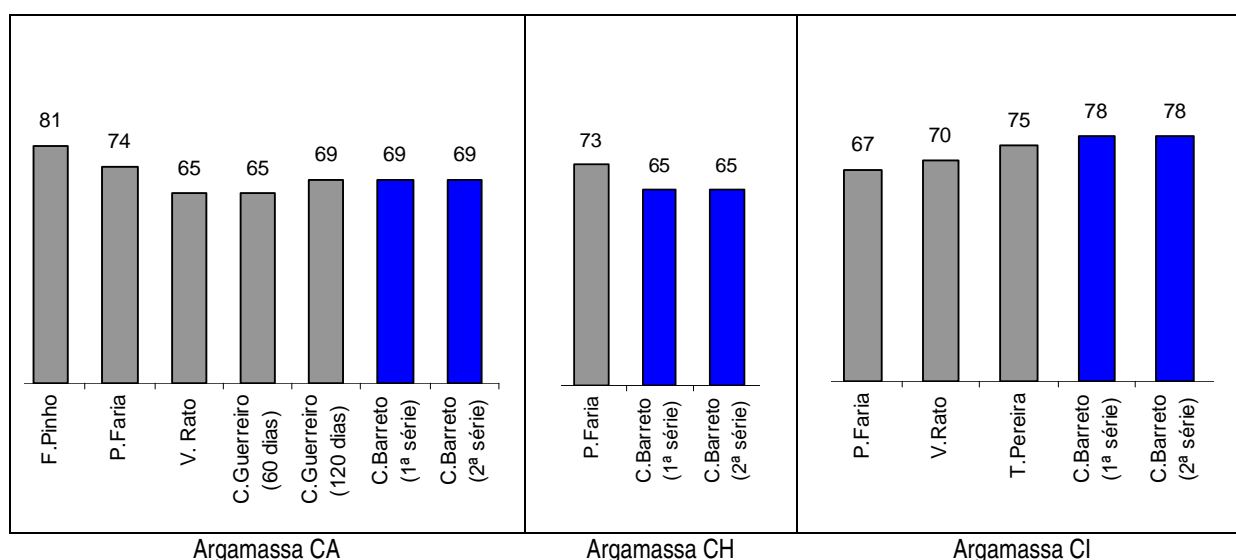


Fig. 3.47 – Comparação de valores do ensaio de **espalhamento** [%] com vários autores

No caso da argamassa de cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de espalhamento por F. Pinho [35], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de F. Pinho é superior, o que implicaria um valor de massa volúmica aparente inferior ao de C. Barreto. No entanto, analisando o gráfico dos valores obtidos no ensaio de massa volúmica aparente (fig. 3.48), observa-se que tal não aconteceu.

De igual modo, comparando P. Faria [13] com a 1ª série de provetes de C. Barreto, observa-se que ocorreu o mesmo que no caso anterior, isto é, apesar de P. Faria ter obtido um valor de espalhamento mais elevado do que C. Barreto, o valor de massa volúmica aparente, posteriormente obtido, foi superior.

No caso da argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de espalhamento por P. Faria [13], com os provetes das 1ª e 2ª séries de C. Barreto, observa-se que o valor de P. Faria é superior, o que implicaria um valor de massa volúmica aparente inferior aos de C.

Barreto. No entanto, analisando o gráfico dos valores obtidos no ensaio de massa volúmica aparente (fig. 3.48), observa-se que tal não se verificou.

No caso da argamassa bastarda de cimento e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de espalhamento por P. Faria [13], com os provetes das 1ª e 2ª séries de C. Barreto observa-se que o valor de P. Faria é inferior, o que implicaria um valor de massa volúmica aparente superior ao de C. Barreto. Ao analisar o gráfico dos valores obtidos no ensaio de massa volúmica aparente (fig. 3.48), observa-se que tal se verificou.

Comparando V. Rato [41] com P. Faria [13] ou com os provetes da 1ª série de C. Barreto ou até mesmo T. Pereira [33] com C. Barreto, observa-se que ocorreu o mesmo que no caso anterior, isto é, com valores de espalhamento superiores obtiveram-se valores de massa volúmica aparente inferiores.

No entanto, o ensaio de consistência por espalhamento é uma determinação muito pouco fiável, utilizada apenas para, de algum modo, se ter uma comparação quanto à influência da água no comportamento das argamassas. Daí que deste ensaio não se devam procurar retirar grandes ilações.

- **Massa volúmica real e massa volúmica aparente:**

Os valores de massa volúmica real não são discutidos pois como esta característica despreza os vazios existentes na argamassa, não tem influência directa na avaliação dos parâmetros de resistência mecânica e módulo de elasticidade.

Os valores da massa volúmica aparente foram, de algum modo, já tidos em conta juntamente com a análise do espalhamento.

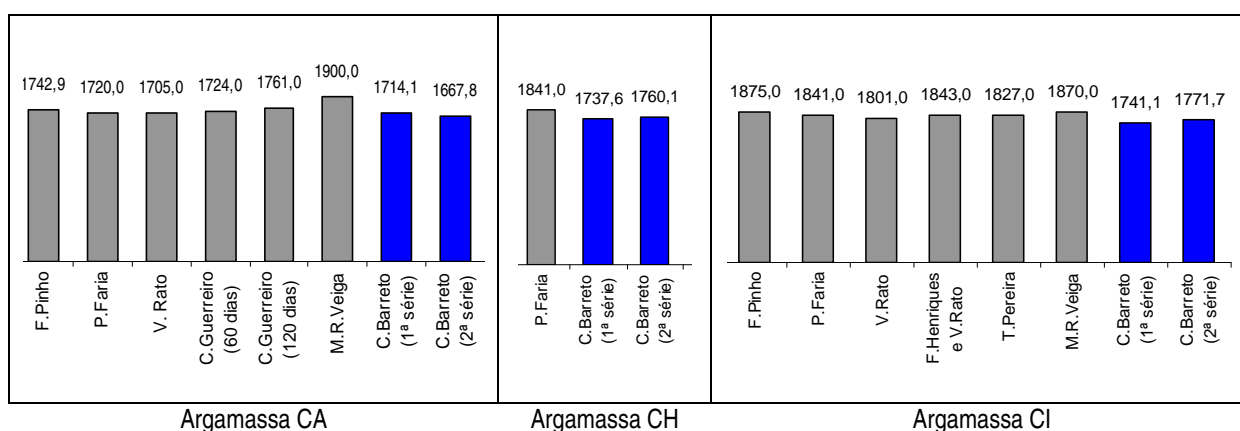


Fig. 3.48 – Comparação de valores do ensaio de **massa volúmica aparente** [kg/m³] com vários autores

- **Porosidade aberta:**

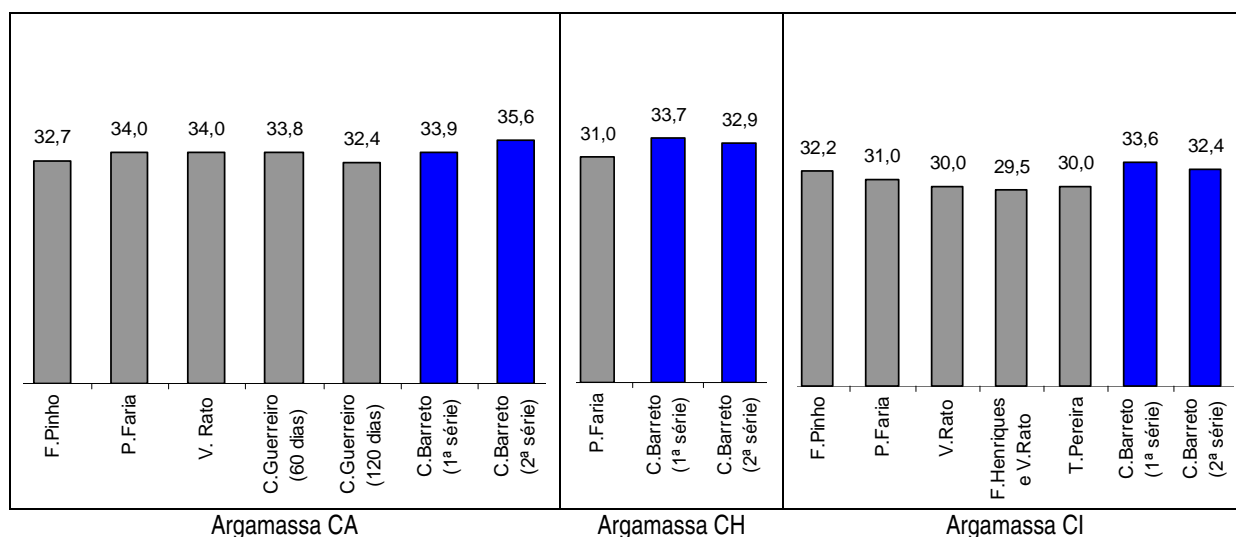


Fig. 3.49 – Comparação de valores do ensaio de **porosidade aberta** [%] com vários autores

À parte de outros factores, uma maior porosidade aberta (logo, menor compactidade) conduz a uma menor resistência mecânica e um menor módulo de elasticidade dinâmico.

Em relação à argamassa de cal aérea, e na comparação directa de F. Pinho [35] com a 1ª série de provetes de C. Barreto, verificou-se que esta situação não ocorreu.

No entanto, na comparação de F. Pinho [35] com a 2ª série de provetes de C. Barreto, verifica-se que uma maior porosidade aberta, obtida por C. Barreto, conduziu a menores resistências mecânicas, mas a um maior módulo de elasticidade.

Em relação à argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea e comparando o valor obtido no ensaio de porosidade aberta (fig. 3.49) por P. Faria [13] com os valores obtidos na 1ª e 2ª séries de provetes de C. Barreto, verifica-se que o valor de P. Faria sendo inferior, conduziu a menores resistências mecânicas (fig. 3.52) e a um menor módulo de elasticidade dinâmico (fig. 3.51).

No mesmo sentido, comparando o valor obtido de porosidade aberta (fig. 3.49) nos provetes da 1ª série de C. Barreto com F. Pinho [35] ou até mesmo com F. Henriques/V. Rato [20], relativamente à argamassa bastarda de cimento e cal aérea, verificou-se aquela regra, isto é, que um valor superior de porosidade aberta, conduziu a menores resistências mecânicas e um menor módulo de elasticidade dinâmico.

Por outro lado, comparando o valor de porosidade aberta (fig. 3.49) obtido por T. Pereira [33] com F. Pinho [35] verifica-se que este último tem um valor superior, o que implicaria um menor módulo de elasticidade dinâmico e menores resistências mecânicas. Analisando o gráfico dos valores obtidos

pelos vários autores no módulo de elasticidade dinâmico (fig. 3.51), observa-se que T. Pereira obteve um módulo de elasticidade inferior ao de F. Pinho. No entanto, observando o gráfico das resistências mecânicas (fig. 3.52), observa-se que neste caso F. Pinho conseguiu maiores resistências mecânicas.

- **Absorção de água por capilaridade:**

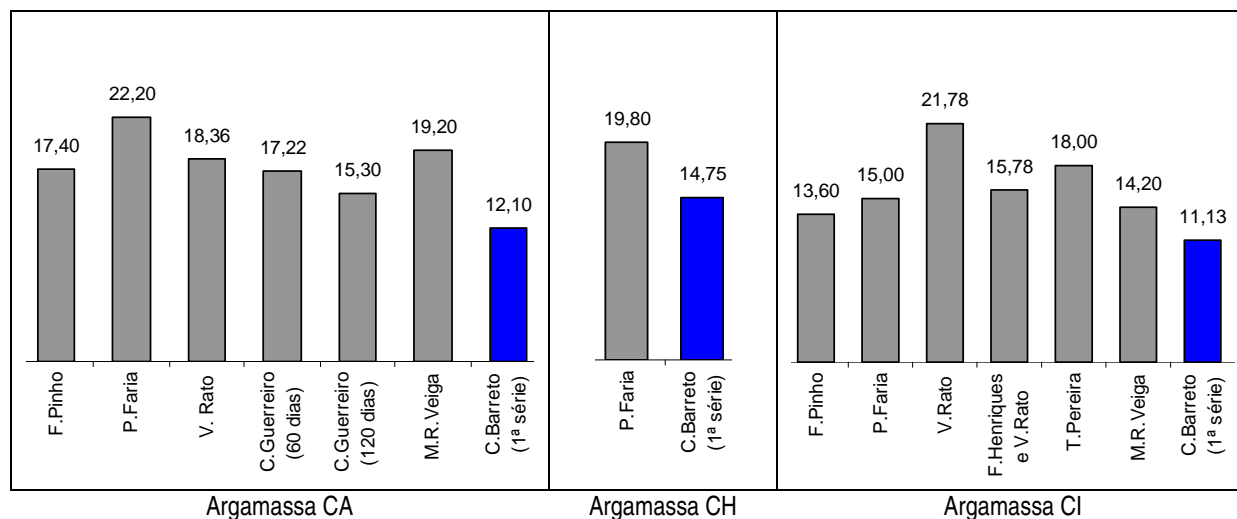


Fig. 3.50 – Comparação de valores do **coeficiente de absorção de água por capilaridade** [kg/m².h<sup>1/2</sup>] com vários autores

O valor assintótico obtido no ensaio de absorção de água por capilaridade depende, além da porosidade aberta total, das dimensões do provete ensaiado. Deste modo, os valores de VA obtidos pelos diversos autores, que se apresentam no Capítulo II, não são discutidos, pois o ensaio na presente dissertação decorreu com meios provetes, não se sabendo se todos os outros foram ensaiados com iguais dimensões.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade é influenciado pela porometria das argamassas. Quanto menor for a dimensão do poro capilar, maior será a quantidade de água absorvida por capilaridade pela argamassa. Porém, o ensaio de porometria não foi realizado na presente dissertação. Por isso, faz-se uma relação do ensaio de absorção de água por capilaridade com o ensaio de porosidade aberta.

No caso da argamassa de cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de absorção de água por capilaridade por F. Pinho [35], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de coeficiente de absorção de água por capilaridade obtido por F. Pinho é inferior, o que se deve a um valor de porosidade aberta inferior ao de C. Barreto, como se observa no gráfico da fig. 3.49.

No caso de C. Guerreiro, aos 60 e aos 120 dias [17], observa-se que ocorreu o mesmo que no caso anterior, isto é, valores mais elevados de porosidade aberta levaram a valores superiores de coeficiente de absorção de água por capilaridade.

No caso da argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de porosidade aberta por P. Faria [13], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de P. Faria é inferior, o que implica um valor de coeficiente de absorção de água inferior ao de C. Barreto. Analisando o gráfico dos valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade (fig. 3.50), verifica-se que tal não aconteceu.

No caso da argamassa bastarda de cimento e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de porosidade aberta por F. Pinho [35], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de F. Pinho é inferior, o que implica um valor de coeficiente de absorção de água inferior ao de C. Barreto, o que, analisando o gráfico dos valores obtidos nesse ensaio (fig. 3.50), observa-se que se verificou.

Comparando F. Henriques/V. Rato [20] com os provetes da 1ª série de C. Barreto, observa-se que C. Barreto obteve um valor de porosidade aberta superior, não obtendo no entanto um valor superior de coeficiente de absorção de água em relação a F. Henriques/V. Rato [20].

- **Módulo de elasticidade dinâmico:**

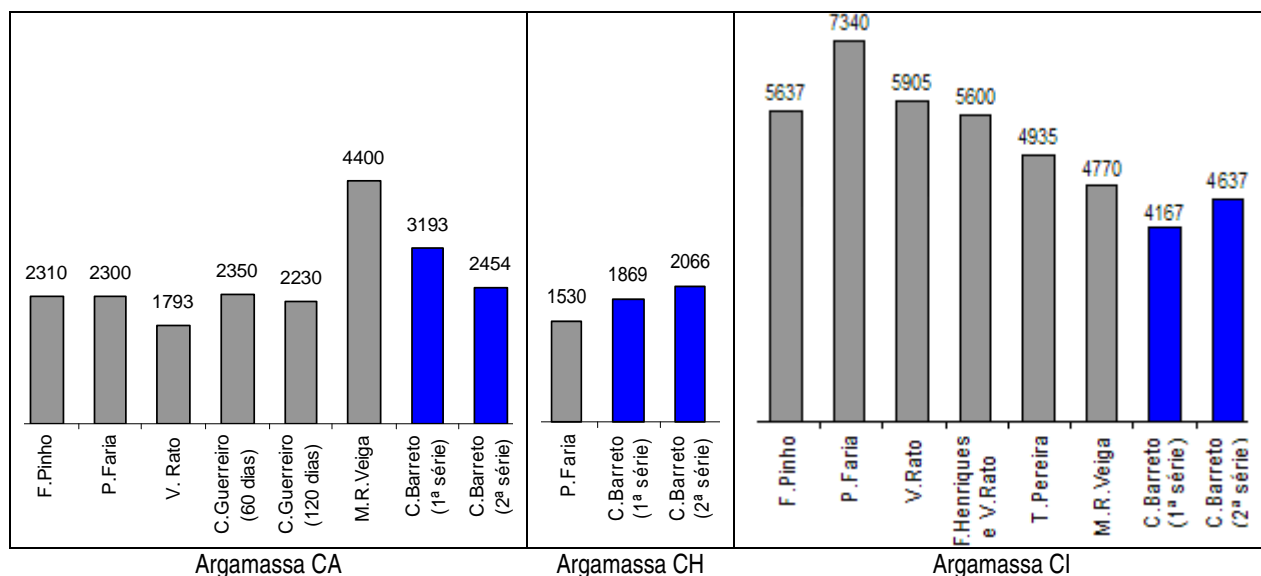


Fig. 3.51 – Comparação de valores do ensaio de **módulo de elasticidade dinâmico** [MPa] com vários autores

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a massa volúmica de uma argamassa, variando estas duas características de forma directamente proporcional.

No caso da argamassa de cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por F. Pinho [35], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de F. Pinho é superior, o que deveria levar a um valor de módulo de elasticidade dinâmico superior ao de C. Barreto. Analisando o gráfico dos valores obtidos nesse ensaio (fig. 3.51), observa-se que tal não aconteceu.

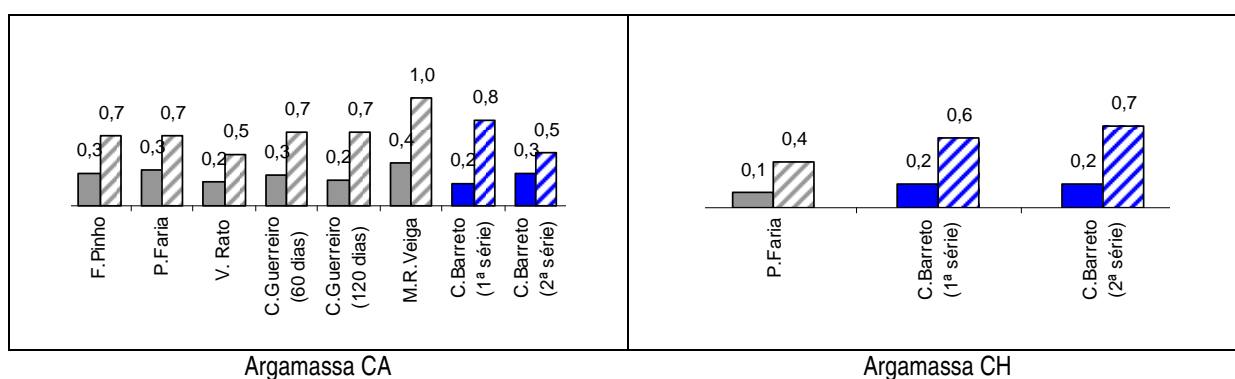
Comparando o valor de massa volúmica aparente obtido por M. R. Veiga [57] com o valor obtido na 1ª série de provetes de C. Barreto, observa-se que o valor de M. R. Veiga é superior, conduzindo a um maior valor de módulo de elasticidade dinâmico, como se pode observar no gráfico da fig. 3.521

No caso da argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por P. Faria [13], com os provetes da 1ª e 2ª séries de C. Barreto observa-se que o valor de P. Faria é superior, não conduzindo, no entanto, a valores de módulo de elasticidade superiores ao de C. Barreto.

No caso da argamassa bastarda de cimento e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por F. Pinho [35], com os provetes quer da 1ª, quer da 2ª séries de C. Barreto observa-se que o valor de F. Pinho é superior, o que implica um valor de módulo de elasticidade dinâmico superior aos de C. Barreto, o que, analisando o gráfico dos valores obtidos nesse ensaio (fig. 3.51), observa-se que se verificou.

Comparando F. Henriques/V. Rato [20] com T. Pereira [33] observa-se que ocorreu o mesmo que no caso anterior, isto é, um valor de massa volúmica aparente superior conduziu a um valor de módulo de elasticidade dinâmico superior.

- **Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão:**



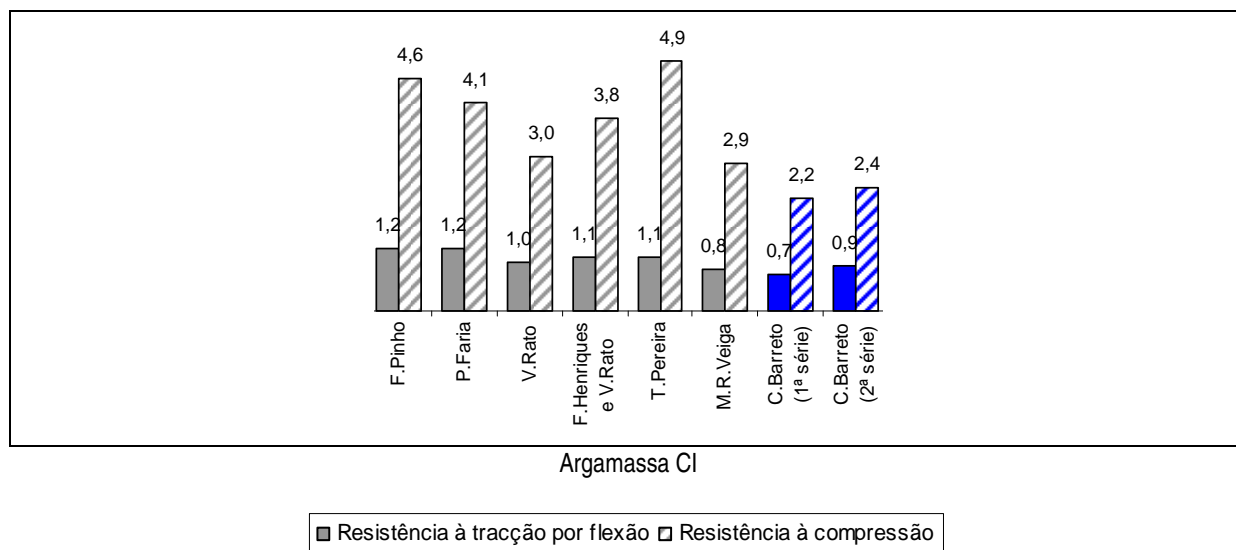


Fig. 3.52 – Comparação de valores do ensaio de **resistência à tracção por flexão [MPa]** e de **resistência à compressão [MPa]** com vários autores

No caso da argamassa de cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por F. Pinho [35], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de F. Pinho é superior, o que implica um valor de porosidade aberta inferior e valores de resistências mecânicas superiores aos de C. Barreto. Comparando, inicialmente, com os valores de porosidade aberta, e analisando o gráfico dos valores obtidos nesse ensaio (fig. 3.49), observa-se que esse aspecto se verificou, mas que no caso das resistências mecânicas não.

Comparando V. Rato [41] com C. Guerreiro [17], e tendo em conta que ambos os ensaios decorreram aos 60 dias de idade, observa-se que ocorreu o mesmo que no caso anterior, isto é, que V. Rato obteve um valor de massa volúmica aparente inferior ao de C. Guerreiro, o que levou a um valor de porosidade aberta superior e resistências mecânicas inferiores ao de C. Guerreiro, como seria de esperar.

No caso da argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por P. Faria [13], com os provetes quer da 1ª, quer da 2ª série de C. Barreto, observa-se que o valor de P. Faria é superior, o que implicava um valor de porosidade aberta inferior e resistências mecânicas superiores. No primeiro caso esse facto ocorreu mas no segundo caso não.

No caso da argamassa bastarda de cimento e cal aérea, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente por F. Pinho [35], com os provetes da 1ª série de C. Barreto observa-se que o valor de F. Pinho é superior, o que implica um valor de porosidade aberta inferior e resistências mecânicas superiores ao de C. Barreto, o que, analisando o gráfico dos valores obtidos no ensaio de

porosidade aberta e resistências mecânicas (fig. 3.49 e 3.52, respectivamente), observa-se que se verificou.

Comparando P. Faria [13] com V. Rato [41] observa-se que ocorreu o mesmo que no caso anterior, isto é, valores de massa volúmica aparente superiores conduziram a valores de resistências mecânicas superiores. No entanto, o valor de porosidade aberta de P. Faria deveria ter sido inferior ao de V. Rato, o que não se verificou.

- **Profundidade de carbonatação** (aos 90 dias de idade dos provetes):

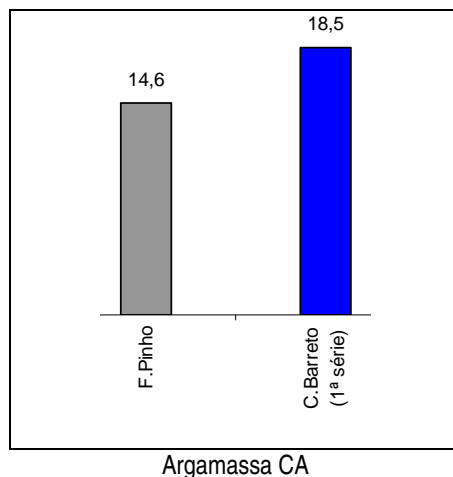


Fig. 3.53 – Comparação de valores do ensaio de **profundidade de carbonatação** [mm] com vários autores

Pela análise do gráfico da fig. 3.53, observa-se que C. Barreto obteve um valor superior no ensaio de profundidade de carbonatação, relativamente a F. Pinho [35], o que pode ter sido devido ao facto de os provetes de argamassa da presente dissertação terem tido um ambiente de cura mais condicionado e por C. Barreto ter obtido valores superiores de porosidade aberta (fig. 3.49), o que fez com que a carbonatação da argamassa ocorresse mais depressa.

Como se pode verificar pela análise gráfica dos valores obtidos (figs. 3.47 a 3.53), a caracterização dos provetes moldados para esta dissertação está próxima dos diversos resultados obtidos pelos vários autores analisados, tabela 3.12.



Tabela 3.12 – Enquadramento dos resultados

Argamassa	Característica	Unidades	Valor mín	Autor	Valor máx	Autor
Cal aérea e areia (CA) (1:3)	Espalhamento	[%]	65	V. Rato [41]; C. Guerreiro (60d) [17]	81	F. Pinho [35]
	Massa volúmica aparente	[kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1667,8</b>	C. Barreto	1900,0	M. R. Veiga [57]
	Porosidade aberta	[%]	32,4	C. Guerreiro (120 d) [17]	<b>35,6</b>	C. Barreto
	Coef. abs. água por cap.	[kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	<b>12,10</b>	C. Barreto	22,20	P. Faria [13]
	Módulo de elast. dinâmico	[MPa]	1793	V. Rato [41]	4400	M. R. Veiga [57]
	Resist. à tracção por flexão		<b>0,2</b>	C. Barreto	0,4	
	Resist. à compressão		<b>0,5</b>		1,0	
	Profund. de carbonatação	[mm]	14,6	F. Pinho [35]	<b>18,5</b>	C. Barreto
Cal hidráulica, cal aérea e areia (CH) (1:1:6)	Espalhamento	[%]	<b>65</b>	C. Barreto	73	P. Faria [13]
	Massa volúmica aparente	[kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1737,6</b>		1841,0	
	Porosidade aberta	[%]	31,0	P. Faria [13]	<b>33,7</b>	C. Barreto
	Coef. abs. água por cap.	[kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	<b>14,75</b>	C. Barreto	19,8	P. Faria [13]
	Módulo de elast. dinâmico	[MPa]	1530	P. Faria [13]	<b>2066</b>	C. Barreto
	Resist. à tracção por flexão		0,1		<b>0,2</b>	
	Resist. à compressão		0,4		<b>0,7</b>	
Cimento, cal aérea e areia (CI) (1:1:6)	Espalhamento	[%]	67	P. Faria [13]	<b>78</b>	C. Barreto
	Massa volúmica aparente	[kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1741,1</b>	C. Barreto	1875,0	F. Pinho [35]
	Porosidade aberta	[%]	29,5	F. Henriques/V. Rato[20]	<b>33,6</b>	C. Barreto
	Coef. abs. água por capil.	[kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	<b>11,13</b>	C. Barreto	21,78	V. Rato [41]
	Índice de secagem	---	<b>0,013</b>		0,015	T. Pereira [33]
	Módulo de elast. dinâmico	[MPa]	<b>4167</b>		7340	P. Faria [13]
	Resist. à tracção por flexão		<b>0,7</b>		1,2	
	Resist. à compressão		<b>2,2</b>		4,9	T. Pereira [33]

A proximidade dos valores obtidos neste trabalho experimental e os diversos autores referidos nas tabelas 3.9 a 3.12 confere segurança a esta campanha experimental.

De igual forma, a proximidade da maioria dos valores obtidos nesta dissertação com os resultados alcançados por F. Pinho [35] (tabelas 3.9 a 3.12) permite afirmar, de certo modo, que a análise da durabilidade face aos sais solúveis das argamassas de cal aérea (CA), bastarda de cal hidráulica e cal aérea (CH) e bastarda de cimento e cal aérea (CI), estudada neste trabalho, pode ser extrapolada para as correspondentes composições utilizadas naquele trabalho, isto é, os resultados obtidos nesta dissertação no estudo da resistência das argamassas face aos sais solúveis, poderiam ser os obtidos no principal trabalho de referência a este trabalho [35], caso então tivessem sido realizados.

Exceptua-se nesta análise os resultados obtidos no ensaio de resistência das argamassas face aos cloretos, em virtude das avarias técnicas ocorridas na câmara climática.



## DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS FACE AOS SAIS SOLÚVEIS.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 4.1 – Considerações iniciais

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos de ensaio e os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade face aos sais solúveis (cloretos e sulfatos) das argamassas de cal aérea e bastardas. Após a apresentação dos resultados de durabilidade face aos sulfatos é efectuada uma análise aos valores obtidos. Em relação ao ensaio de durabilidade face aos cloretos, apenas se apresentam os resultados (não é efectuada a sua análise), devido a problemas técnicos ocorridos na câmara climática que levaram a que estes valores não pudessem ser considerados na sua totalidade.

A campanha experimental decorreu nos laboratórios de materiais de construção do DEC-FCT/UNL.

## 4.2 – Provetes utilizados

Dos provetes referidos nas tabelas 3.2 e 3.3 do Capítulo 3, apenas foram utilizados, nestes ensaios de durabilidade, os provetes indicados nas tabelas 4.1 e 4.2, que estão apresentadas de seguida, pois alguns dos provetes já tinham sido utilizados em ensaios de caracterização da argamassa endurecida.

Os índices 1 e 2 seguidos do número dos provetes, no caso da primeira série de provetes, indicam se o provete foi utilizado no ensaio de resistência aos cloretos da primeira série (caso do 1) ou no ensaio de resistência aos sulfatos (caso do 2).

Em relação à segunda série de provetes, essa numeração secundária não foi necessária porque numa das metades dos provetes só se realizou o ensaio de resistência aos cloretos, sendo a outra metade usada na repetição de alguns ensaios de caracterização da argamassa endurecida.

Tabela 4.1 – Provetes utilizados nos ensaios de resistência aos cloretos

Material	Provetes	
	1ª série	2ª série
Argamassa de cal aérea (CA)	CA4-1 a CA6-1	CA12 a CA14
Argamassa de cal hidráulica e cal aérea (CH)	CH4-1 a CH6-1	CH7 a CH9
Argamassa de cimento e cal aérea (CI)	CI4-1 a CI6-1	CI7 a CI10

Tabela 4.2 – Provetes utilizados nos ensaios de resistência aos sulfatos

Material	Provetes
Argamassa de cal aérea (CA)	CA4-2 a CA6-2
Argamassa de cal hidráulica e cal aérea (CH)	CH4-2 a CH6-2
Argamassa de cimento e cal aérea (CI)	CI4-2 a CI6-2

### **4.3 – Ensaios de durabilidade face aos sais solúveis**

Para conhecer as resistências das argamassas face aos sais solúveis (cloretos e sulfatos), principal objectivo da presente dissertação, foram realizados ensaios de durabilidade. O ensaio de resistência aos sulfatos, foi realizado apenas na primeira série de provetes, enquanto que no caso do ensaio de resistência aos cloretos, este foi realizado nas duas séries devido a problemas na câmara climática que fez com que não se obtivessem resultados válidos para a primeira série de provetes. No entanto, eles também são apresentados. Aquando da repetição do ensaio de resistência aos cloretos, os resultados da segunda série são indicados logo após os da primeira.

No Anexo II encontram-se os resultados de cada provete ensaiado, assim como os desvios padrão.

Anteriormente à realização dos ensaios de durabilidade face aos sais solúveis, todos os provetes utilizados nos ensaios foram pesados. Nas tabelas II.1 a II.3 do Anexo II indicam-se os valores das pesagens.

#### **4.3.1 – Resistência aos cloretos**

O ensaio de determinação de resistência aos cloretos foi realizado, para a 1ª série de provetes, aos 94 dias, e para a 2ª série<sup>20)</sup>, aos 164 dias de idade após a moldagem, com base em P. Faria [13] e na ficha de ensaio Fe 12 [51]. Neste ensaio foram utilizadas as metades resultantes dos prismas ensaiados à flexão, que foram apenas utilizados no ensaio de variação dimensional linear e no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Os equipamentos utilizados e o procedimento de ensaio seguido [51], foram os apresentados de seguida, fig. 4.1.

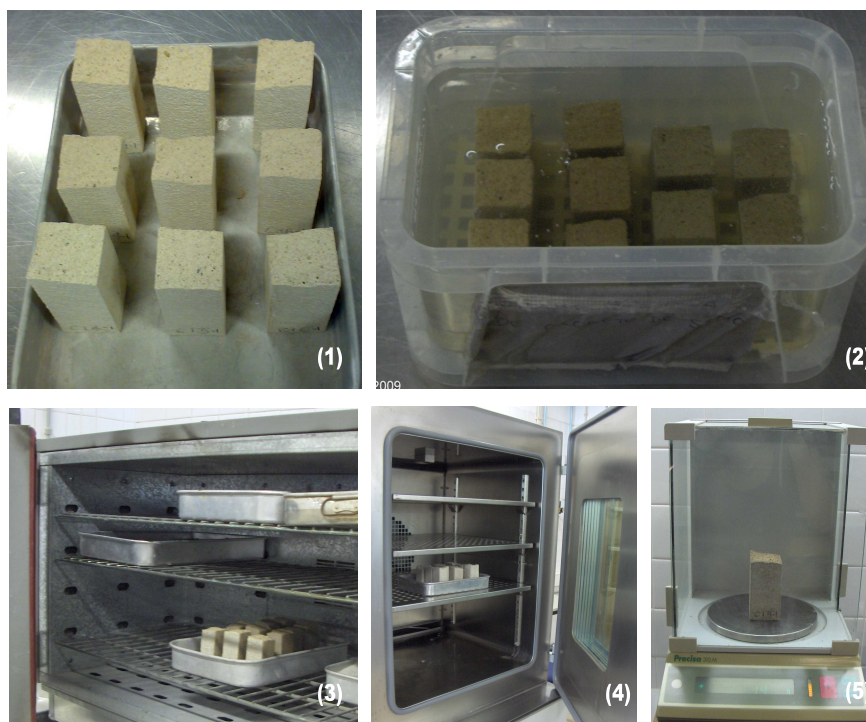
- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - balança com precisão de 0,001 g;
  - câmara climática Fitoclima 300 EDTU da Aralab;
  - recipiente para a realização da contaminação dos provetes;
  - cloreto de sódio.

---

<sup>20)</sup> Como referido anteriormente, recorreu-se a uma 2ª série de ensaios após se verificar uma avaria na câmara climática (perturbação do seu funcionamento resultante de falhas de energia eléctrica verificadas no departamento; descontrolo na transição entre ciclos e nos valores de temperatura e humidade relativa). Porém, a reparação foi insuficiente, pelo que os resultados da 2ª série também ficaram comprometidos.

- Procedimento de ensaio:
  - i) secagem dos provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm 5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
  - ii) preparação da solução saturada de cloreto de sódio;
  - iii) pesagem dos provetes secos,  $M_0$ ;
  - iv) colocação dos provetes em imersão na solução saturada de cloreto de sódio durante 24 h;
  - v) colocação dos provetes na estufa a  $T=90\pm 5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
  - vi) pesagem dos provetes secos, com cloretos retidos,  $M_1$ ;
  - vii) colocação dos provetes na câmara climática, onde são sujeitos a ciclos sucessivos de 12 h a 40% de humidade relativa e 12 h a 90% de humidade relativa, sempre com uma  $T=23^{\circ}\text{C}$ .
  - viii) pesagem dos provetes e verificação do seu estado de integridade, no fim do ciclo seco, a cada 3 ciclos completos.

A solução saturada de cloreto de sódio foi obtida dissolvendo 1 Kg de cloreto de sódio em 2,78 L de água aquecida. Estes valores foram conseguidos sabendo que a solubilidade do cloreto de sódio a  $25^{\circ}\text{C}$  é de 35,9 g por cada 100 mL de água; isto é, 359 g por cada 1 L de água [60]. Após o arrefecimento da solução, confirmou-se que não havia deposição significativa de sal no fundo do recipiente.



1 – provetes no início do ensaio; 2 – imersão dos provetes (neste caso a 2ª série); 3 – colocação dos provetes em estufa para atingirem massa constante; 4 – colocação dos provetes na câmara climática; 5 – pesagem dos provetes

Fig. 4.1 – Ensaio de determinação da resistência dos provetes aos cloretos

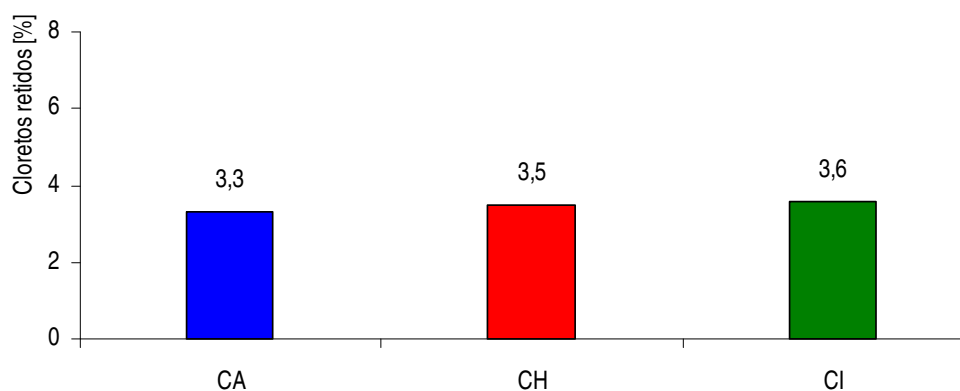
Realizaram-se ciclos de humedecimento/secagem/pesagem, determinando-se a perda de massa até à conclusão de 50 ciclos ou até à rotura dos provetes.

Através da diferença entre as massas secas dos provetes antes e após a imersão na solução, determinou-se a quantidade de cloretos retidos, em termos de percentagem em relação à sua massa seca inicial, de acordo com a seguinte expressão [13]:

$$\text{Cloretos retidos} = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

sendo:  $M_1$  a massa seca após imersão na solução saturada de cloreto de sódio [g];  $M_0$  a massa seca inicial [g].

Na fig. 4.2 encontra-se a percentagem média de cloretos retidos neste ensaio para a primeira série de provetes. Os resultados obtidos em cada provete apresentam-se na tabela II.4, no Anexo II.



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 4.2 – Percentagem média de cloretos retidos nos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série)

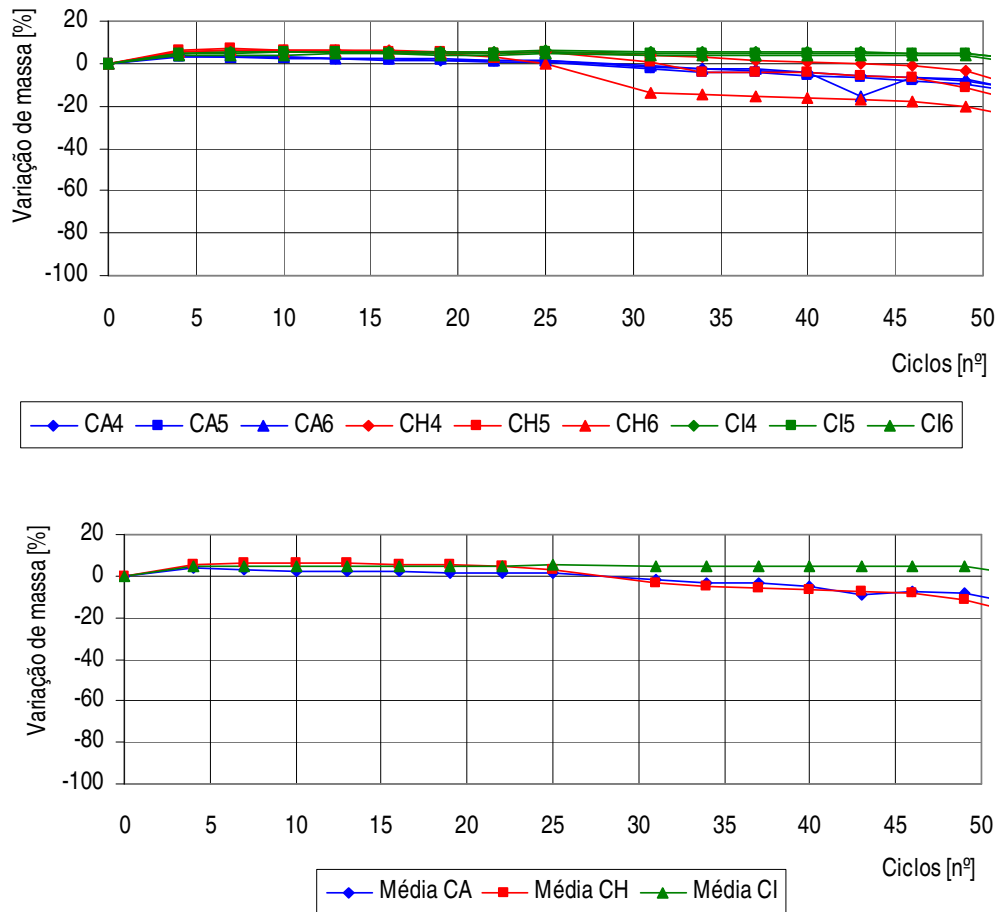
Na tabela 4.3 apresenta-se a resistência das argamassas da 1ª série de provetes face à acção dos cloretos, em termos de valores médios de variação de massa nos 10º, 19º, 31º, 40º e 49º ciclos. Na fig. 4.3 apresentam-se os valores individuais e médios da variação de massa da 1ª série de provetes ao longo dos ciclos.

Os valores de todos os provetes e em todos os ciclos, assim como os valores de desvio padrão, apresentam-se no Anexo II, nas tabelas II.6 a II.8, para a 1ª série de provetes, seguidos dos respectivos gráficos, figs. II.1 a II.3.

Tabela 4.3 – Resistência dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série) face aos cloretos – média da variação de massa

Provetes <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Variação de massa – média [%]				
			10º ciclo	19º ciclo	31º ciclo	40º ciclo	49º ciclo
CA-1	18-07 a 05-09-09	179 d	2,63	1,72	-1,85	-4,76	-8,36
CH-1			6,29	5,37	-3,06	-6,72	-11,61
CI-1			4,91	4,86	4,65	4,56	4,40

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia



– Em cima: valores individuais; em baixo: valores médios

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 4.3 – Resistência dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série) face aos cloretos – variação de massa

Na fig. 4.4 apresenta-se os provetes CA-1, CH-1 e CI-1 aos 94 dias de idade, antes do início do ensaio de resistência aos cloretos da 1ª série de provetes. Na fig. 4.5 a 4.7 mostra-se a evolução dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série), respectivamente, ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos.



Fig. 4.4 – Vista geral dos provetes de argamassa CA-1, CH-1 e CI-1 (1ª série), antes do início do ensaio de resistência aos cloretos



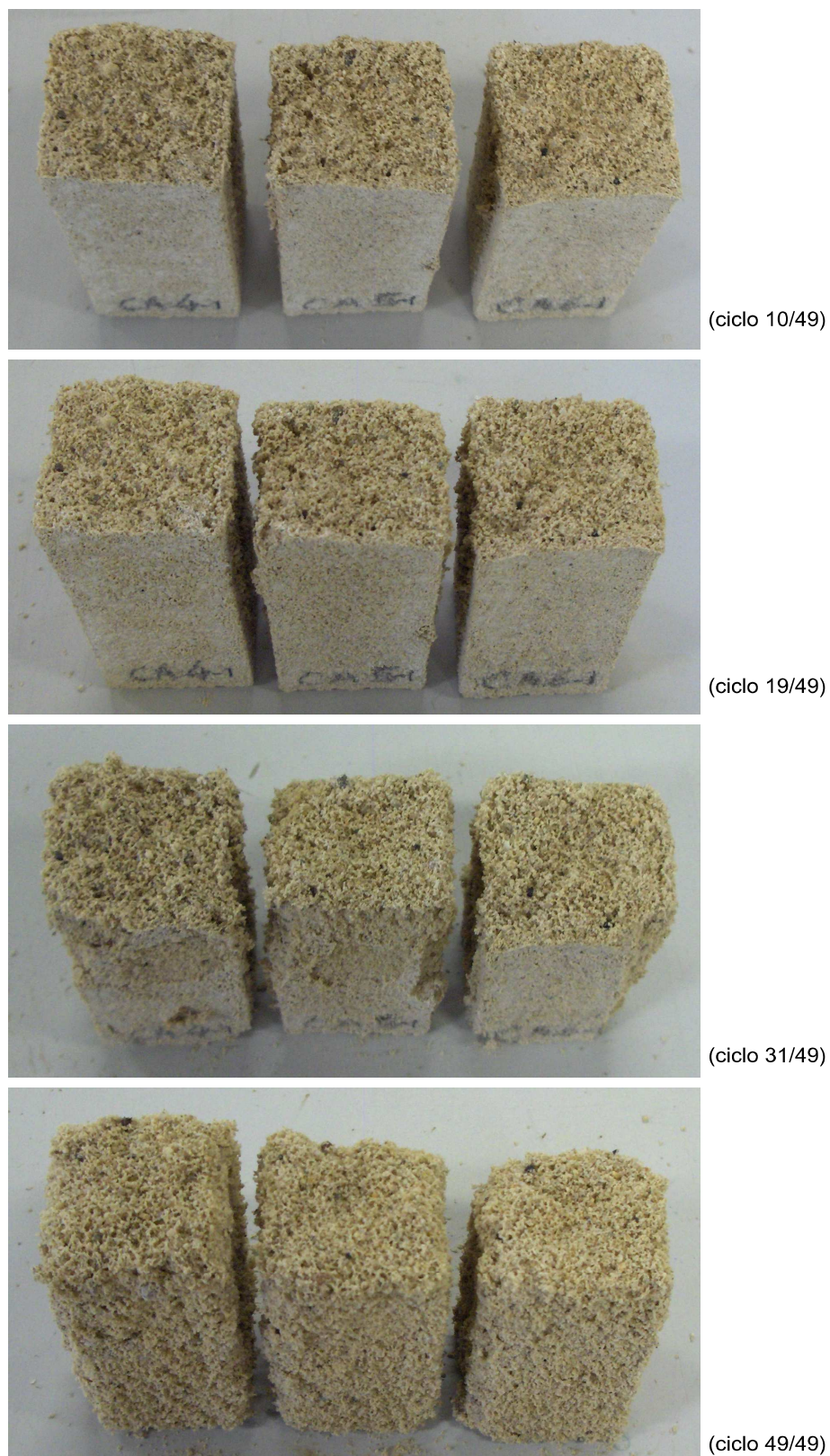


Fig. 4.5 – Evolução dos provetes de argamassa CA-1 (1ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos





Fig. 4.6 – Evolução dos provetes de argamassa CH-1 (1ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos



(ciclo 10/49)



(ciclo 19/49)



(ciclo 31/49)

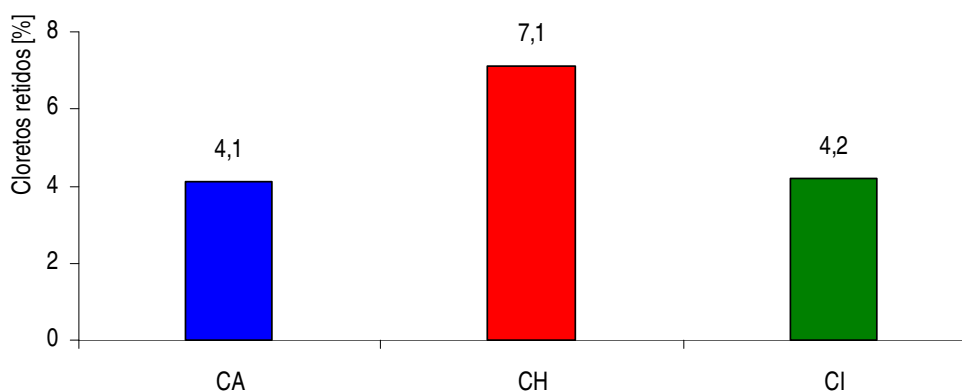


(ciclo 49/49)

Fig. 4.7 – Evolução dos provetes de argamassa CI-1 (1ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos



Na fig. 4.8 encontra-se a percentagem média de cloretos retidos neste ensaio para a segunda série de provetes. Os resultados obtidos em cada provete apresentam-se na tabela II.5, no Anexo II.



<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 4.8 – Percentagem média de cloretos retidos nos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série)

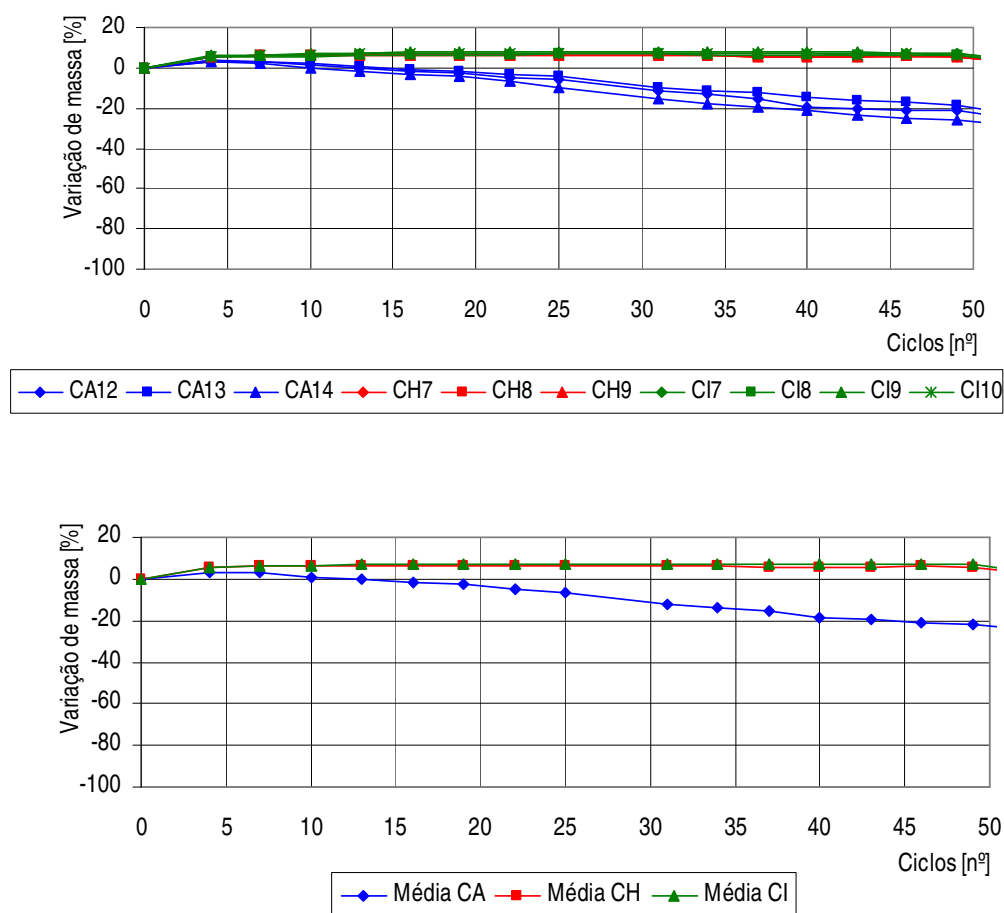
Na tabela 4.4 apresenta-se a resistência das argamassas estudadas, da 2ª série de provetes, face à acção dos cloretos, em termos de valores médios de variação de massa nos 10º, 19º, 31º, 40º e 49º ciclos. Na fig. 4.9 apresentam-se os valores individuais e médios da variação de massa da 2ª série de provetes ao longo dos ciclos.

Os valores de todos os provetes e em todos os ciclos, assim como o desvio padrão, apresentam-se no Anexo II, nas tabelas II.9 a II.11, para a 2ª série, seguidos dos respectivos gráficos, figs. II.4 a II.6.

Tabela 4.4 – Resistência dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) face aos cloretos – média da variação de massa

Proвете <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Variação de massa – média [%]				
			10º ciclo	19º ciclo	31º ciclo	40º ciclo	49º ciclo
CA	18-07 a 05-09-09	179 d	1,06	-2,86	-11,92	-18,45	-21,78
CH			6,27	6,14	6,01	5,87	5,84
CI			6,58	7,12	7,08	6,97	6,87

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia



– Em cima: valores individuais; em baixo: valores médios

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 4.9 – Resistência dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) face aos cloretos – variação de massa

Na fig. 4.10 apresentam-se os provetes CA, CH e CI aos 164 dias de idade, antes do início do ensaio de resistência aos cloretos da 2ª série de provetes. Nas figs. 4.11 a 4.13 mostra-se a evolução ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos dos provetes da 2ª série CA, CH e CI, respectivamente.



Fig. 4.10 – Vista geral dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série), antes do início do ensaio de resistência aos cloretos

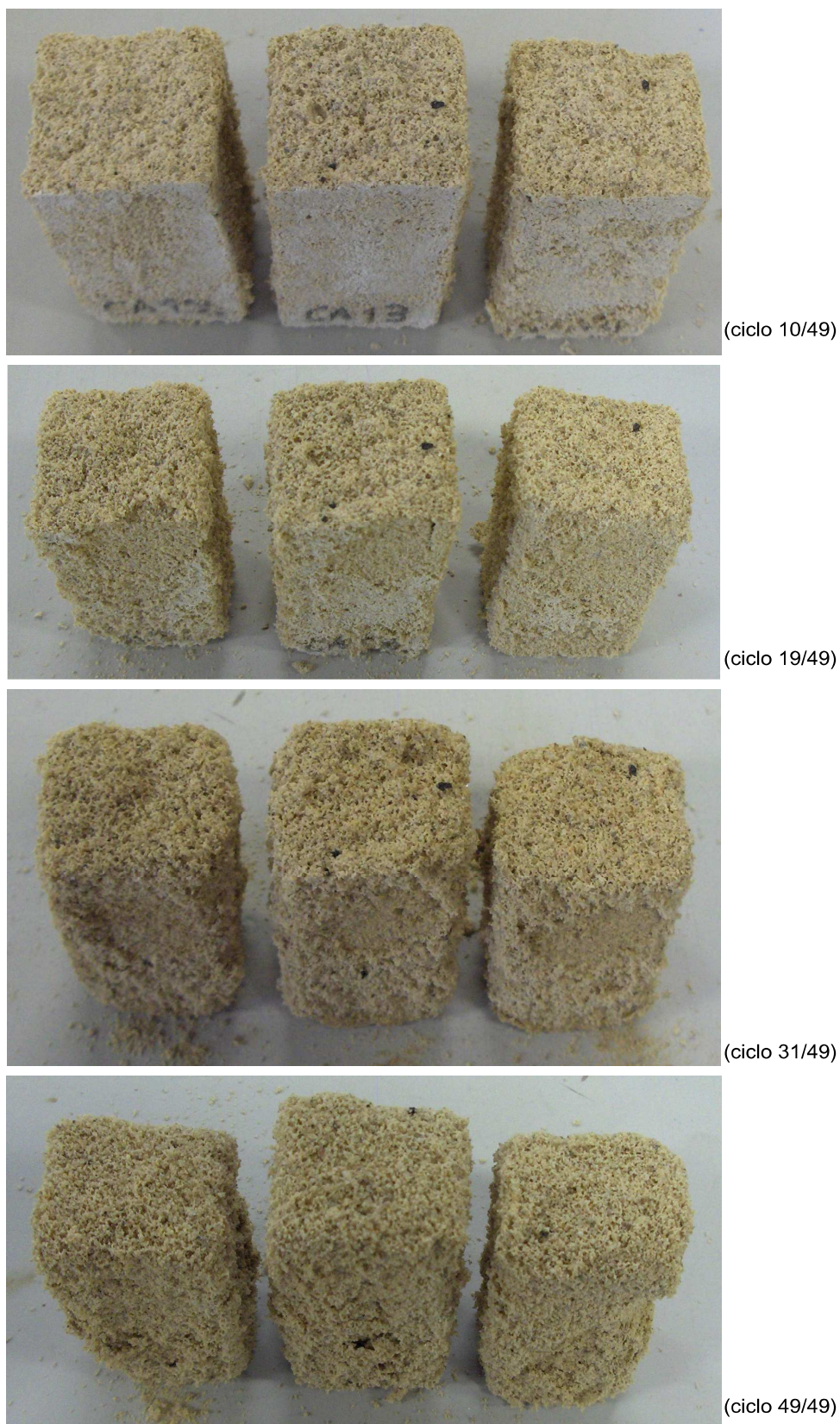


Fig. 4.11 – Evolução dos provetes de argamassa CA (2ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos



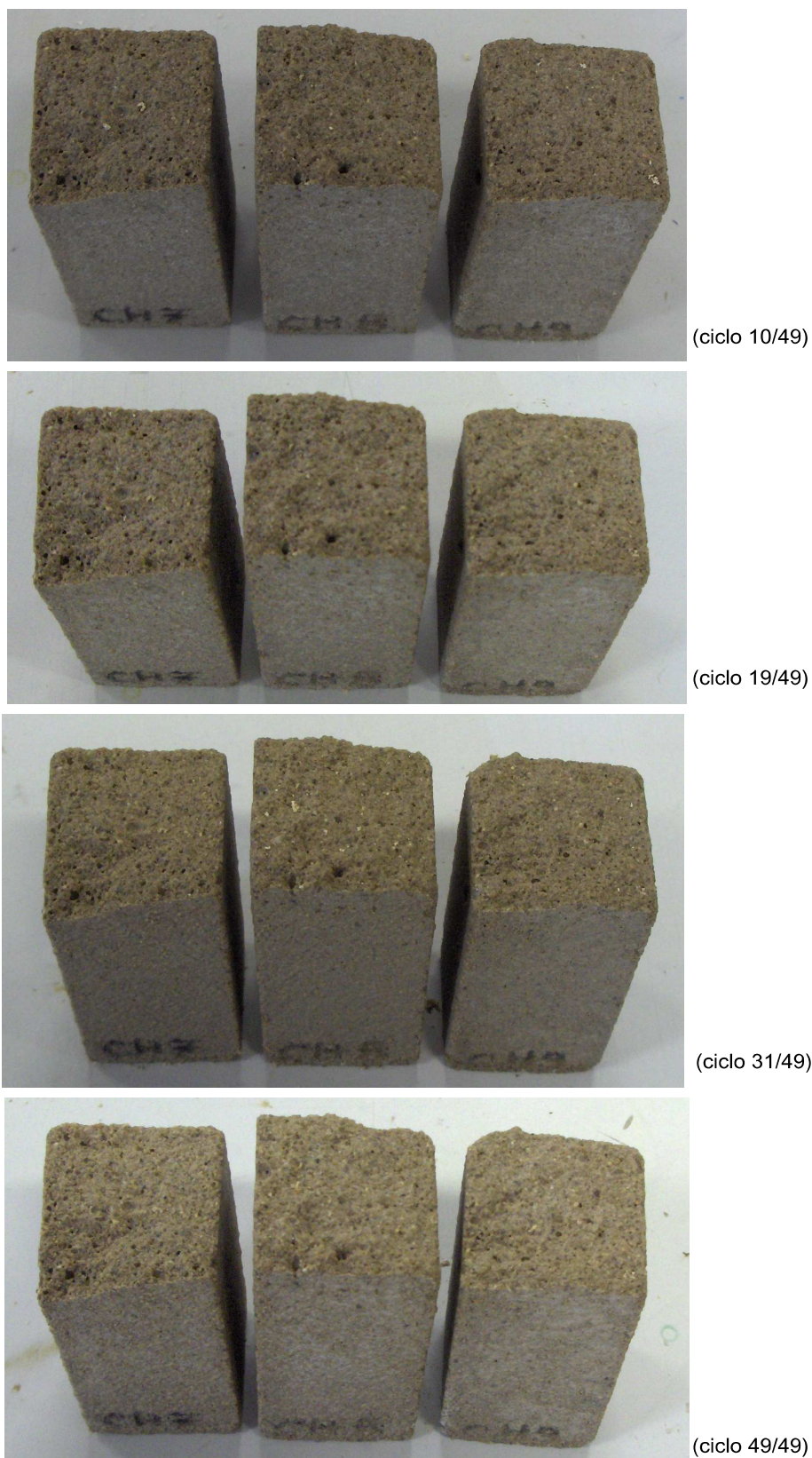


Fig. 4.12 – Evolução dos provetes de argamassa CH (2ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos



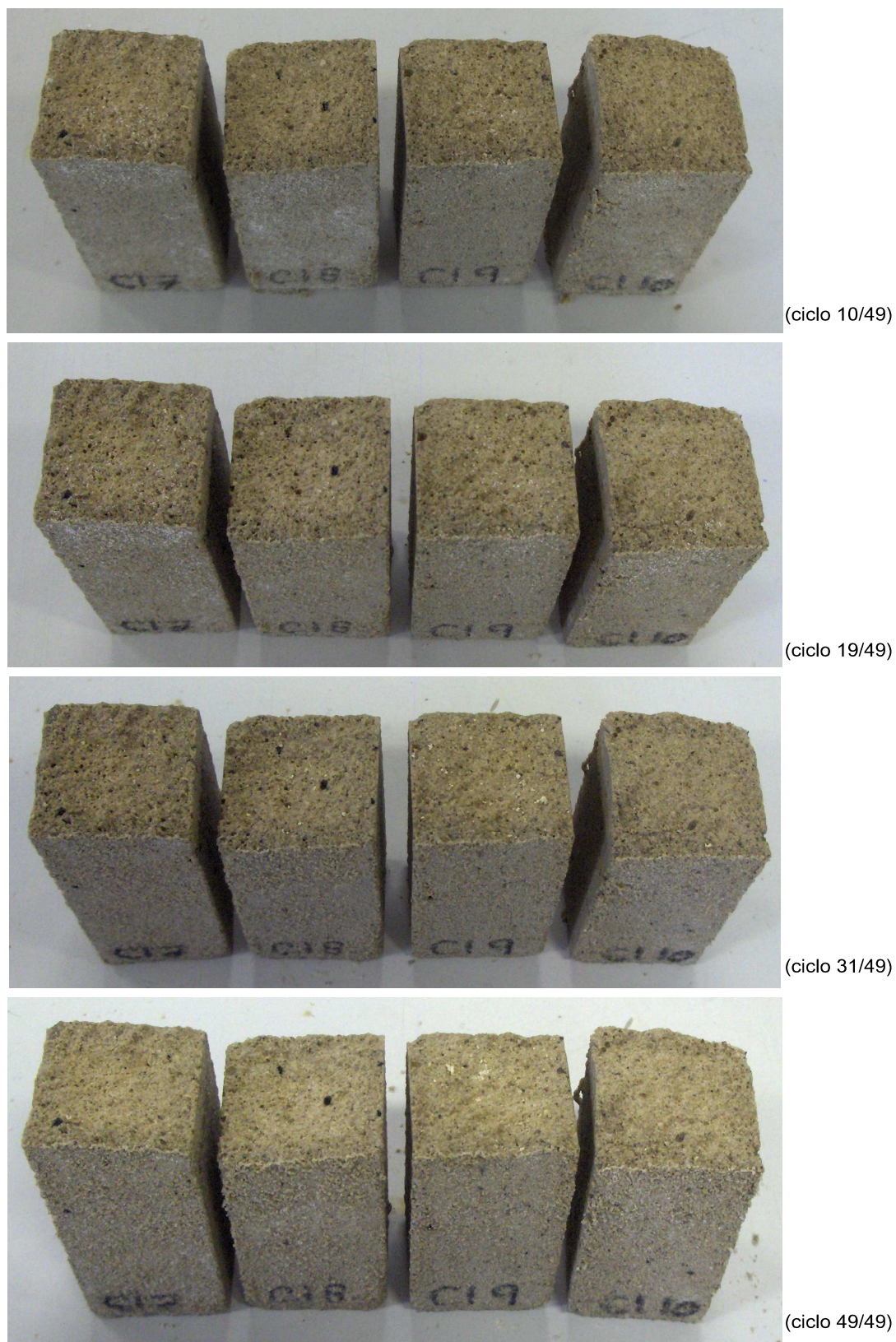


Fig. 4.13 – Evolução dos provetes de argamassa CI (2ª série) ao longo de 49 ciclos de ataque por cloretos

### 4.3.2 – Resistência aos sulfatos

O ensaio de determinação de resistência aos sulfatos foi realizado aos 95 dias de idade dos provetes após a moldagem, de acordo com o procedimento definido por P. Faria [13], que se baseia na norma NP EN 12370 [27].

Neste ensaio foram utilizadas as “segundas” metades resultantes dos prismas ensaiados à flexão, que foram apenas utilizados no ensaio de variação dimensional linear e no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Os equipamentos utilizados e o procedimento seguido [13], fig. 4.14, foram os apresentados de seguida.

- Equipamentos de ensaio:
  - estufa ventilada;
  - balança com precisão de 0,001 g;
  - recipiente para a realização da imersão dos provetes;
  - solução de sulfato de sódio anidro a 6%.
- Procedimento de ensaio:
  - i) preparação da solução de sulfato de sódio anidro a 6%;
  - ii) secagem dos provetes em estufa ventilada a  $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até massa constante;
  - iii) pesagem dos provetes secos  $M_0$ ;
  - iv) colocação dos provetes em imersão na solução de sulfato de sódio durante 2 h;
  - v) colocação dos provetes na estufa a  $T=90\pm5^{\circ}\text{C}$  durante 21h30;
  - vi) arrefecimento durante cerca de 30 min e pesagem dos provetes no fim de cada ciclo.

A solução de sulfato de sódio foi obtida pela dissolução de 65,8 g de sulfato de sódio anidro com concentração de 6,17%, equivalente a 14% de sulfato de sódio decahidratado (através do conhecimento das massas moleculares<sup>21)</sup>) em 1 L de água à temperatura ambiente.

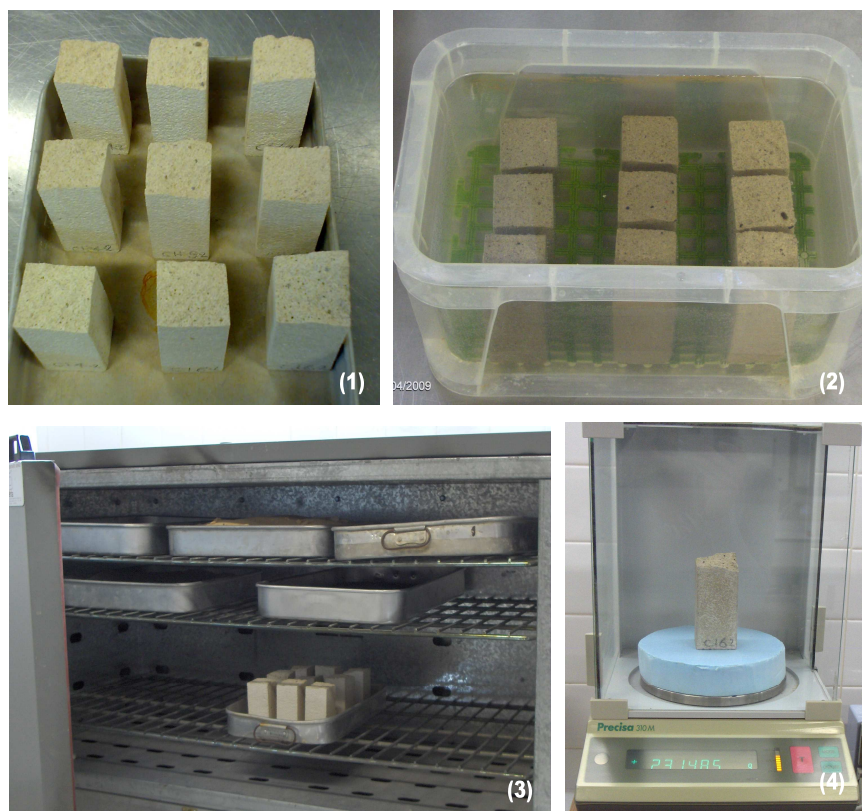
Na imersão garantiu-se que existia um afastamento de pelo menos 1 cm entre os provetes e de 2 cm entre os provetes e os bordos do recipiente, e que o nível da solução acima dos provetes tinha no mínimo 8 mm de altura.

---

<sup>21)</sup> A massa molecular do sulfato de sódio é de 142 g/mol, enquanto que a do sulfato de sódio decahidratado é de 322 g/mol [30]. Sabendo que uma solução a 6,17% de sulfato de sódio anidro equivale a 6,17 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  em 100 g de solução, então:

$$\frac{6,17\text{g}(\text{Na}_2\text{SO}_4)}{x(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O})} = \frac{142\text{g}(\text{Na}_2\text{SO}_4)}{322\text{g}(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O})} \Leftrightarrow x = 13,99\text{g} \cong 14\text{g}(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) \text{ em } 100 \text{ g de solução, logo}$$
equivalente a 14% de sulfato de sódio decahidratado.





1 – provetes no início do ensaio; 2 – imersão dos provetes; 3 – secagem dos provetes em estufa; 4 – pesagem dos provetes

Fig. 4.14 – Ensaio de determinação da resistência dos provetes aos sulfatos

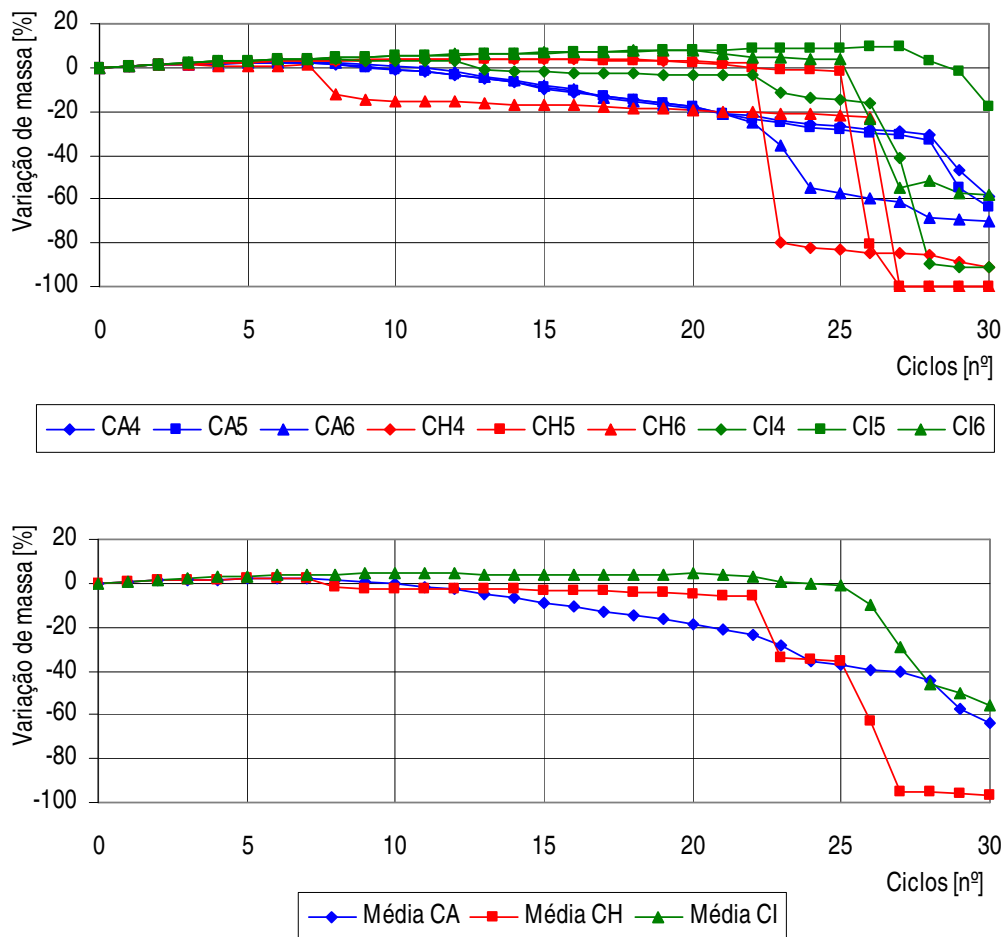
Realizaram-se ciclos diários de imersão/secagem/pesagem, determinando-se a perda de massa até à realização de 30 ciclos ou até à rotura dos provetes.

Na tabela 4.5 apresenta-se a resistência das argamassas estudadas face à acção dos sulfatos, em termos de valores médios de variação de massa nos 5º, 10º, 15º, 20º, 25º e 30º ciclos. Na fig. 4.15 apresentam-se os valores individuais e médios da variação de massa dos provetes ao longo dos ciclos. Os valores de evolução e variação de massa de todos os provetes em todos os ciclos, assim como os valores de desvio padrão, são apresentados no Anexo II, nas tabelas II.12 a II.14, estando seguidas dos respectivos gráficos, figs. II.7 a II.9.

Tabela 4.5 – Resistência dos provetes de argamassa CA-2, CH-2 e CI-2 (1ª série) face aos sulfatos – média da variação de massa

Provede <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Variação de massa – média [%]					
			5º ciclo	10º ciclo	15º ciclo	20º ciclo	25º ciclo	30º ciclo
CA-2	25-04 a 25-05-09	95 d	2,12	-0,18	-8,96	-18,29	-37,48	-64,10
CH-2			2,05	-2,59	-2,98	-4,82	-35,69	-97,16
CI-2			3,29	4,60	3,87	4,32	-0,68	-55,63

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia



– Em cima: valores individuais; em baixo: valores médios

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. 4.15 – Resistência dos provetes de argamassa CA-2, CH-2 e CI-2 (1ª série) face aos sulfatos – variação de massa

Na fig. 4.16 apresentam-se os provetes de argamassa CA-2, CH-2 e CI-2 aos 95 dias de idade, antes do início do ensaio de resistência aos sulfatos e nas figs. 4.17 a 4.19 mostra-se a evolução do seu estado de integridade ao longo dos 30 ciclos de ataque por sulfatos.



Fig. 4.16 – Vista geral dos provetes CA-2, CH-2 e CI-2 (1ª série) antes do início do ensaio de resistência aos sulfatos

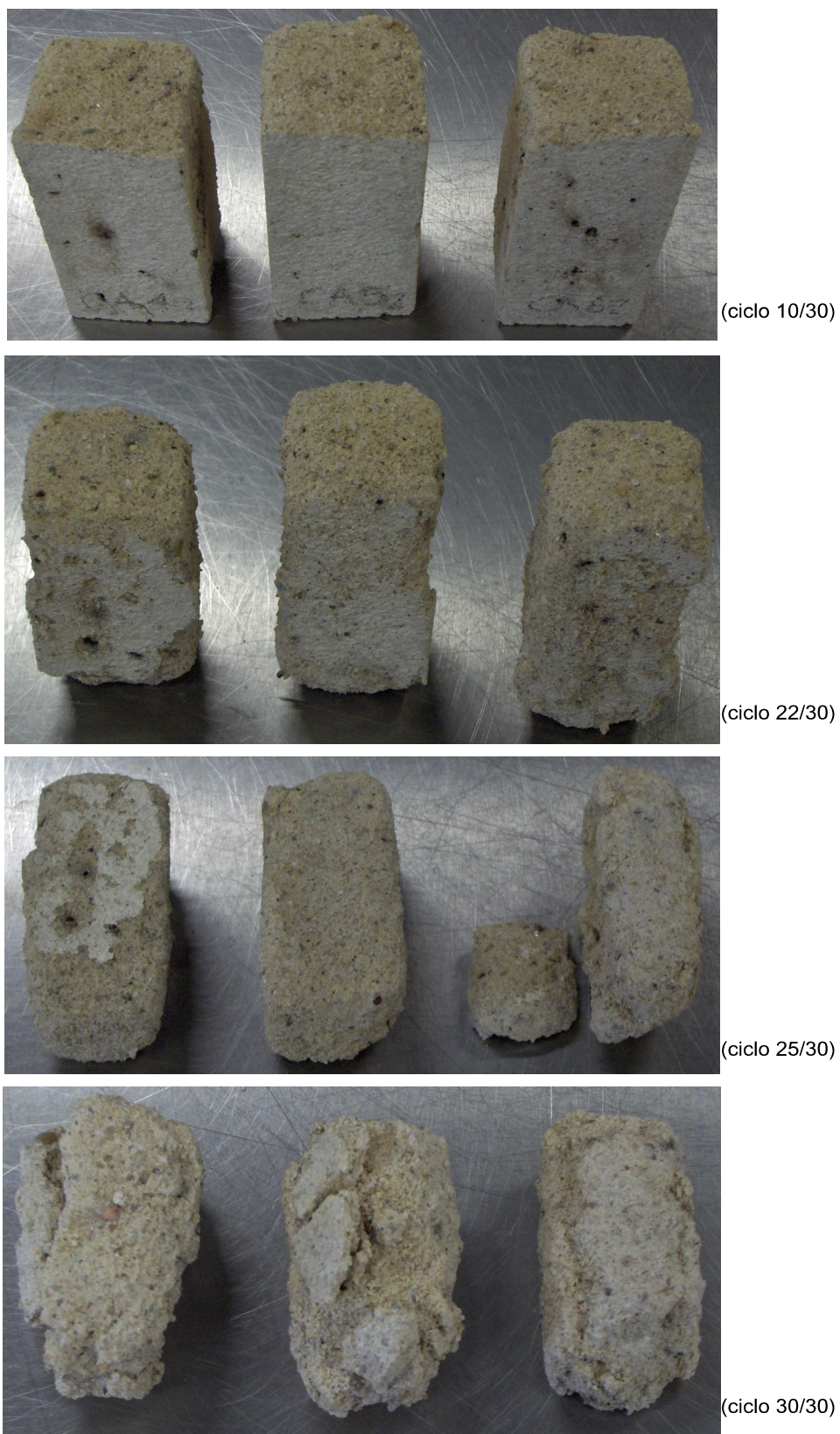


Fig. 4.17 – Evolução dos provetes de argamassa CA-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos





(ciclo 10/30)



(ciclo 22/30)



(ciclo 25/30)



(ciclo 30/30)

Fig. 4.18 – Evolução dos provetes de argamassa CH-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos

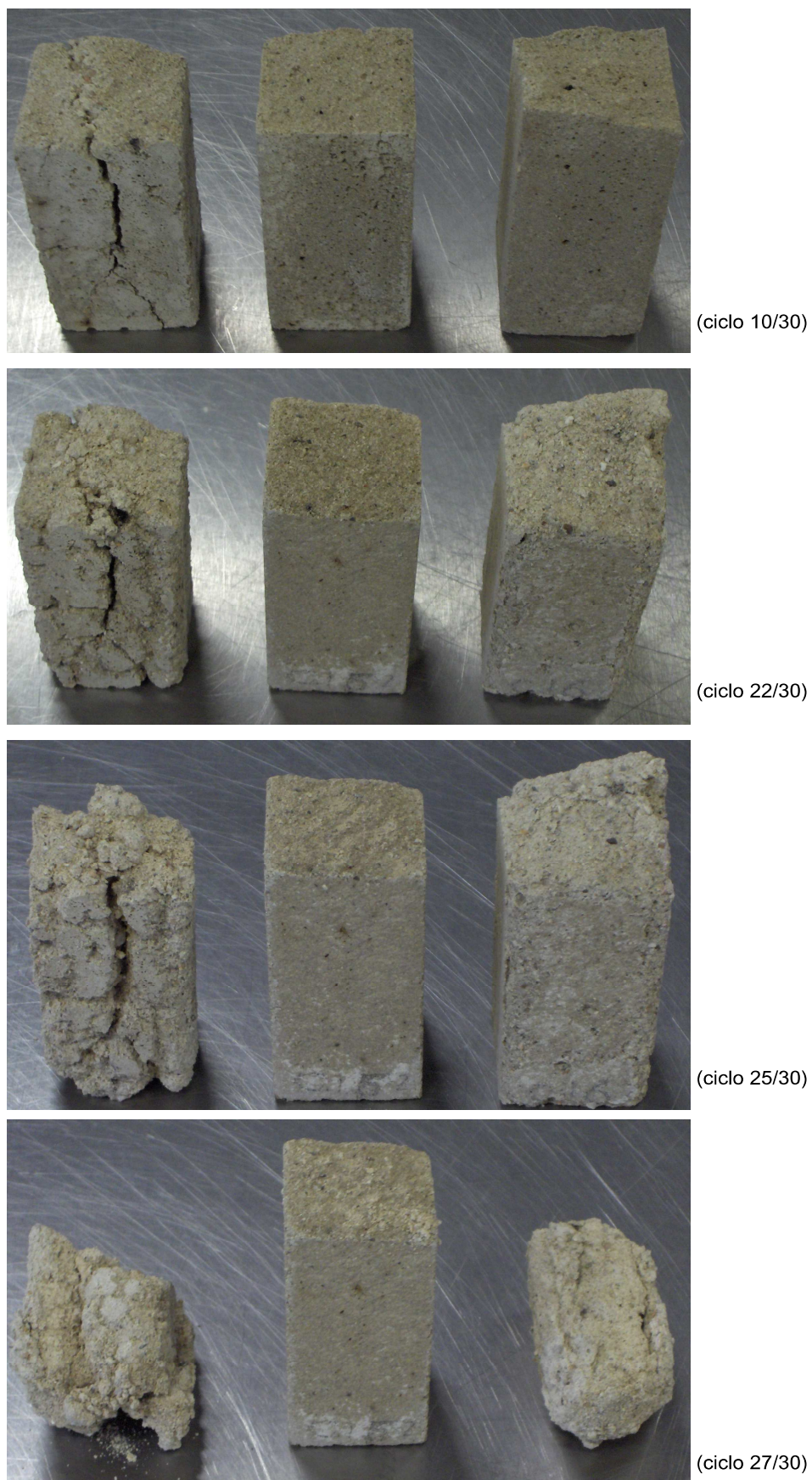


Fig. 4.19 – Evolução dos provetes de argamassa CI-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos





Fig. 4.19 (continuação) – Evolução dos provetes de argamassa CI-2 (1ª série) ao longo de 30 ciclos de ataque por sulfatos

Para resistir às acções mecânica e química causadas pelos sulfatos, é importante conhecer a constituição e a composição química das argamassas e as suas resistências mecânicas. À partida, argamassas com resistências mecânicas mais elevadas possuem uma maior resistência à acção dos sulfatos, nomeadamente na parcela que resiste à acção mecânica destes sais. No entanto, esta maior resistência à acção dos sulfatos só se confirma numa fase muito inicial, uma vez que as resistências mecânicas são proporcionais à hidraulicidade das argamassas, e por seu turno, proporcional aos teores em aluminatos e silicatos de cálcio hidratados. Face ao ataque por sulfatos, estes compostos produzem sulfo-aluminatos e sulfo-silicatos de cálcio hidratados, cuja acção é bastante destrutiva, e mesmo elevadas resistências mecânicas podem não ser suficientes para lhes resistirem [13].

Outro aspecto a ter em consideração é o facto de argamassas com maior porosidade, e que apresentam maior capacidade de absorção de água, tenderem a acumular uma maior quantidade de sais. Por conseguinte, tendencialmente podem apresentar uma menor resistência à sua acção, uma vez que lhes são associadas menores resistências mecânicas (maior porosidade, menor compacidade, menor resistência mecânica).

Analisando, de um modo geral, o gráfico da fig. 4.15, observa-se que o melhor comportamento face à acção dos sulfatos pertenceu à argamassa bastarda de cimento e cal aérea e o pior comportamento à argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea. Este comportamento da argamassa bastarda de cimento e cal aérea seria de esperar numa fase inicial (como foi referido), visto que este tipo de argamassa apresentou maiores resistências mecânicas do que as argamassas de cal aérea e bastarda de cal hidráulica e cal aérea (fig. 3.23) e, também porque os valores de porosidade aberta obtidos para os três tipos de argamassa foram praticamente iguais (fig. 3.29).

Por outro lado, e em termos gerais, o pior comportamento por parte dos provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e aérea era esperado, devido às resistências mecânicas mais baixas e à existência de compostos hidráulicos que reagem com os sulfatos. O bom comportamento inicial desta

argamassa não era esperado, visto que este tipo de argamassa foi o que obteve menores resistências mecânicas, logo esperava-se uma fase inicial com variação de massa significativa. Deste modo, o comportamento das argamassas de cal aérea e bastarda de cimento e cal aérea durante o ensaio não foi o previsto. Esperava-se um pior comportamento por parte da argamassa bastarda de cimento e cal aérea, devido ao seu maior teor de ligante hidráulico, provocar a formação de sulfo-aluminatos ou sulfo-silicatos, quando os sulfatos, na presença de humidade, reagissem com os aluminatos ou silicatos de cálcio hidratados, presentes no cimento, causando a maior destruição dos provetes. O melhor comportamento previsto seria por parte da argamassa de cal aérea, que apesar de não ter tido resistências mecânicas tão elevadas como a de argamassa bastarda de cimento e cal aérea, não tem compostos hidráulicos (silicatos nem aluminatos de cálcio hidratados) que possam reagir com os sulfatos, na presença de humidade, provocando os referidos sulfo-aluminatos ou sulfo-silicatos. Assim, é provável que, neste caso, a acção dos sulfatos fosse essencialmente mecânica.

Uma análise mais detalhada dos gráficos da fig. 4.15, e no caso da argamassa de cal aérea (CA), observou-se que no início do ensaio e até ao 8º ciclo as suas massas tiveram um ligeiro aumento, começando logo a partir desse ciclo a perder massa de forma constante até ao 30º ciclo. No final do ensaio, observou-se que estes provetes permaneceram com cerca de 40% da sua massa inicial. Apesar dos provetes de argamassa de cal aérea terem tido resistências mecânicas mais baixas do que os provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, tiveram um melhor comportamento do que estes últimos devido à inexistência de ataque químico.

Em relação aos provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea (CH), constata-se também que tiveram um ligeiro aumento de massa inicial até ao 7º ciclo, e que daí e até ao 22º ciclo mantiveram essa massa constante. Na transição do 22º para o 23º ciclo, estes provetes começaram a ter perdas de massa bruscas, após o que estabilizaram até ao 25º ciclo. Nessa altura tiveram novas perdas de massa bruscas até ao 27º ciclo. A partir desse ciclo e até ao final do ensaio, os provetes mantiveram a sua massa constante, observando-se que no final dos 30 ciclos praticamente não restaram provetes. De acordo com o referido anteriormente, este comportamento deve-se aos ataques químico e mecânico, sem suficientes resistências mecânicas para os suportar.

Por fim, em relação aos provetes de argamassa bastarda de cimento e cal aérea (CI), constata-se que estes provetes tiveram um ligeiro aumento de massa inicial até ao 10º ciclo, mantendo-a constante até ao 22º ciclo, altura em que começaram a perder massa. No final dos 30 ciclos estes provetes permaneceram com cerca de 40% da sua massa inicial.

Os ligeiros aumentos de massa obtidos pelos provetes de argamassa CA, CH e CI no início do ensaio podem ter sido devidos ao facto de, durante os ciclos secos, não ter ocorrido a secagem completa da humidade contida nos provetes e, com a introdução dos sais, ter ocorrido higroscopicidade e a sua deposição no seio do material.

Porém, esta análise (perda de massa ao longo do tempo) deve ser complementada com a observação visual da evolução da integridade dos provetes ao longo do tempo.

Assim, comparando os três tipos de argamassa estudados no ensaio de durabilidade aos sulfatos, observa-se pelas figs. 4.17 a 4.19 que, nos primeiros 10 ciclos, os provetes que se mantiveram menos degradados foram os provetes de argamassa de cal aérea. No caso dos provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea apenas um dos provetes perdeu massa superficial e no caso dos provetes de argamassa bastarda de cimento e cal aérea apenas um dos provetes começou a fracturar, mantendo-se os outros dois intactos.

No ciclo 22 observa-se que os provetes de argamassa de cal aérea começaram a perder massa em torno de todo o provete. Em relação ao provete de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, que inicialmente tinha tido degradação, este começou a perder massa. Nos provetes de argamassa bastarda de cimento e cal aérea, apenas o provete que teve uma degradação no ciclo 10, teve um aumento na sua fractura, mantendo-se os outros dois provetes em bom estado.

No ciclo 25 observa-se que os provetes de argamassa de cal aérea tiveram grande perda de massa. No caso dos provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, observa-se que um dos provetes, que até esse ciclo tinha apenas perdido massa superficial, teve uma perda brusca de massa. No caso dos provetes de argamassa bastarda de cimento e cal aérea, estes mantiveram o comportamento que tinham tido até ao ciclo 22.

No último ciclo (30º) observa-se que os provetes de argamassa de cal aérea apresentaram elevada desagregação. No caso dos provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, os dois provetes que se tinham mantido até ao ciclo 25, tiveram uma destruição total, perdendo toda a sua massa. No caso dos provetes de argamassa bastarda de cimento e cal aérea, o provete que desde início tinha fracturado, no fim do ensaio ficou praticamente destruído e os outros dois provetes que tinham tido um bom comportamento acabaram também fracturados e com bastante perda de massa.

Assim, analisando as figuras referentes à evolução dos provetes de argamassa (figs. 4.17 a 4.19) ao longo dos 30 ciclos de ataque por sulfatos, constata-se que os que melhor resistiram foram os provetes de argamassa de cal aérea e os que pior resistiram foram os provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea.



Articulando as análises do gráfico da fig. 4.15 com as imagens da evolução dos provetes (figs. 4.17 a 4.19) pode-se concluir que, das três argamassas, os provetes de argamassa de cal aérea resistiram melhor aos 30 ciclos do ensaio e que os provetes de argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea resistiram pior.

Por fim, apesar dos resultados do ensaio de durabilidade face aos cloretos não terem sido discutidos, faz-se uma breve análise do seu estado de integridade, comparando-o com o ensaio de durabilidade face aos sulfatos. Assim, analisando as figuras referentes à evolução dos provetes de argamassa da 1ª série (figs. 4.5 a 4.7) ou 2ª série (figs. 4.11 a 4.13) dos provetes de argamassa ao longo dos 49 ciclos de ataque por cloretos, com as figuras referentes à evolução dos provetes de argamassa (figs. 4.17 a 4.19) ao longo dos 30 ciclos de ataque por sulfatos, observa-se que no caso do ensaio de durabilidade aos cloretos, a degradação ocorrida nos provetes de argamassa foi mais superficial do que no caso do ensaio de durabilidade aos sulfatos, indicando que no ensaio de durabilidade aos cloretos ocorre apenas uma acção mecânica, que se visualiza à superfície.

No caso do ensaio de durabilidade aos sulfatos parece tanto ocorrer uma acção mecânica como química, esta última causando a rotura e destruição dos provetes de argamassa, possivelmente devido ao desenvolvimento de produtos sulfo-aluminatos ou sulfo-silicatos expansivos.



## **CAPÍTULO V**

### **COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES.**

### **DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

#### **5.1 – Considerações iniciais**

Para este estudo foram analisados vários provetes de argamassa de cal aérea e areia (CA), argamassa bastarda de cal hidráulica, cal aérea e areia (CH) e argamassa bastarda de cimento, cal aérea e areia (CA), com o objectivo de estudar a sua durabilidade face aos cloretos e sulfatos, tendo presente as suas características face a aplicações em alvenaria “ordinária” de paredes antigas, para o reforço dessas paredes.

Foram determinadas algumas características físicas dos materiais utilizados na sua construção e características mecânicas, físicas e químicas da argamassa endurecida.

Neste capítulo tecem-se comentários finais ao trabalho desenvolvido, resumem-se as principais conclusões obtidas, confrontam-se os objectivos propostos com os resultados alcançados e referem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

#### **5.2 – Comentários finais e conclusões**

O estudo desenvolvido foi interessante, pois permitiu rever e aplicar conceitos aprendidos ao longo do curso.

Os resultados obtidos na caracterização das argamassas, em pasta e endurecidas, foram relacionados com o principal trabalho de referência [35], entre outros, com vista a extrapolar o comportamento das argamassas estudadas relativamente à durabilidade destas face aos sais solúveis, neste caso, sulfatos. Devido a avaria do equipamento, o ensaio de durabilidade face aos cloretos não permitiu obter resultados considerados válidos.

Como esperado, a argamassa de cal aérea apresenta uma melhor compatibilidade com a já existente (argamassa de assentamento) na parede de alvenaria “ordinária”. No entanto, e visto que o âmbito deste trabalho é utilizar as argamassas estudadas em soluções de reforço dessas paredes, há que ter em conta que é possível que a argamassa de cal aérea não possua a resistência mecânica que permita conferir à parede um incremento de resistência esperado em trabalhos de reabilitação estrutural. No entanto, e que se tenha conhecimento, situações de reforço de paredes do tipo em análise, com base

em soluções em que se utilizem argamassas com base em cal aérea, não têm sido muito estudadas e podem ser uma possibilidade.

Em termos de compatibilidade entre as argamassas estudadas e a alvenaria “ordinária”, conclui-se neste trabalho que a argamassa bastarda de cimento e cal aérea aparenta ser compatível com a alvenaria constituída maioritariamente por argamassa de cal aérea, quer em termos de módulo de elasticidade, como de porosidade aberta e absorção de água por capilaridade. No entanto, e como esperado, apresenta resistências mecânicas superiores às registadas pela argamassa de cal aérea e maior índice de secagem, o que pode indicar dificuldades na secagem da humidade da parede antiga.

Relativamente à argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea, constatou-se que esta não apresenta ser mais eficiente comparativamente às argamassas de cal aérea e bastarda de cimento e cal aérea, visto que apresentou, quer um mau comportamento face aos sulfatos, quer baixas resistências mecânicas, elevada retracção e maior quantidade de água absorvida.

Um aspecto tido em consideração é o facto dos provetes, ao terem sido moldados com o intuito de obter consistência por espalhamento semelhante e trabalhabilidade comparável, incorporaram diferentes quantidades de água de amassadura por cada composição de argamassa estudada (CA, CH e CI), o que faz com que seja difícil comparar directamente algumas das características estudadas, como por exemplo, as massas volúmicas e a porosidade aberta.

Em termos de durabilidade face aos sulfatos, a argamassa de cal aérea mostrou ter um melhor comportamento, seguindo-se a argamassa bastarda de cimento e cal aérea e, por fim, a argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea. Neste ensaio, a argamassa bastarda de cimento e cal aérea apresentou um bom comportamento inicial e só a partir do 25º ciclo se iniciou a degradação dos provetes em análise. Parece comprovar-se que as boas resistências mecânicas conferem resistência ao ataque por sulfatos durante os ciclos iniciais e que apenas quando os compostos hidráulicos desenvolvidos (aluminatos e silicatos de cálcio hidratados) ficam sulfatados, a degradação passa a ser elevada.

O bom comportamento verificado pela argamassa bastarda de cimento e cal aérea face aos sulfatos durante os ciclos iniciais e a compatibilidade indicada com a alvenaria com argamassa de cal aérea, permite concluir que a utilização deste tipo de argamassa bastarda de cimento e cal aérea numa solução de reforço de uma parede de alvenaria “ordinária” pareça ser possível e melhor que a utilização da argamassa bastarda de cal hidráulica e cal aérea.

No entanto, tendo em conta a ausência de resultados válidos no ensaio de resistência aos cloretos, não se pode concluir com segurança que a argamassa bastarda de cimento e cal aérea tenha o mesmo desempenho face aos cloretos do que teve face aos sulfatos.

### **5.3 – Objectivos propostos e objectivos alcançados**

Como referido na secção 1.7, o principal objectivo proposto para esta dissertação foi estudar o comportamento de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção dos sais solúveis, nomeadamente, sulfatos e cloretos, numa das soluções de reforço estudadas anteriormente no trabalho de investigação realizado por F. Pinho no DEC-FCT/UNL [35]. Desta forma, pode-se dizer que o objectivo não foi alcançado na totalidade, devido aos problemas que surgiram no equipamento durante o ensaio de resistência aos cloretos, o que fez com que esses resultados não pudessem ser considerados na totalidade<sup>22)</sup>. Contudo, o ensaio de resistência aos sulfatos foi bem sucedido.

### **5.4 – Desenvolvimentos futuros**

Referem-se nesta secção alguns desenvolvimentos futuros, quer no âmbito do estudo de soluções de reforço de paredes de alvenaria antigas, quer relativos à análise de argamassas, nomeadamente:

- repetição do ensaio de durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção dos cloretos, de acordo com o procedimento utilizado ou segundo outros procedimentos que demonstrem ser eficientes;
- continuação da análise face aos cloretos e sulfatos de outras soluções de reforço em futuros trabalhos de investigação;
- avaliação das características conjuntas da alvenaria, nomeadamente através da comparação com a caracterização da pedra utilizada;
- análise mais aprofundada da influência da aplicação de argamassas superficiais no reforço de alvenarias antigas, nomeadamente ao nível da interferência na secagem da humidade existente na parede;
- análise de soluções de reforço da alvenaria “ordinária” do tipo da solução de reforço IV, mas com utilização de rede plástica e argamassa com base em cal aérea, semelhante à utilizada na execução das alvenarias.

---

<sup>22)</sup> A partir de certa altura existiu uma fronteira, a partir da qual, não se pôde concluir que o comportamento dos provetes dependeu exclusivamente da sua reacção face aos sais ou do comportamento da câmara climática (aumento brusco da temperatura, descontrolo na transição entre ciclos, entre outras).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABERLE, Thomas; KELLER, Adrian; ZURBRIGGEN, Roger – *Efflorescence. Mechanisms of formation and ways to prevent*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [2] AGOSTINHO, Cláudia Sofia – *Estudo da evolução do desempenho no tempo das argamassas de cal aérea*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Abril de 2008.
- [3] APPLETON, João A. S. – *Estruturas antigas e sais solúveis*. Actas do Seminário Internacional: Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos – Danos, processos e soluções. 2ª edição, LNEC, Lisboa, 2007.
- [4] APPLETON, João – *Reabilitação de edifícios antigos – Patologias e tecnologias de intervenção*. 1ª edição, Edições Orion, Setembro de 2003.
- [5] BRITO, Vânia – *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [6] CHAROLA, A. Elena – *Soluble salts in porous materials and the resulting deterioration*. Lecturer, Graduate Program in Historic Preservation, University of Pennsylvania.
- [7] CHAROLA, A. Elena – *Water absorption and drying behaviour*. Laboratory Notes. HSPV-656 Advanced Architectural Conservation.
- [8] COELHO, Ana Zulmira; TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said – *A cal na construção*. Edição TecMinho, Guimarães, 2009.
- [9] COLLEPARDI, Mario; COLLEPARDI, Silvia; TROLI, Roberto – *Salt weathering of masonry walls. The Venice experience*.

- [10] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) – *Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. EN 1015-3:1999. CEN, February, 1999.
- [11] COUTINHO, António Sousa – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I. 3ª edição, LNEC, Lisboa 1997.
- [12] COUTO, Armanda Bastos; COUTO, João Pedro – *Especificidades e exigências das argamassas na reabilitação de edifícios antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [13] FARIA, Paulina – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2004.
- [14] FARIA, Paulina; HENRIQUES, Fernando M. A.; RATO, Vasco Moreira – *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. Journal of Cultural Heritage 9, pp. 338-346, (Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)), March 2008.
- [15] GONÇALVES, Teresa Diaz – *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Julho de 2007.
- [16] GONÇALVES, Teresa Diaz; RODRIGUES, José Delgado – *Rebocos para paredes antigas afectadas por sais solúveis: patologia, princípios de funcionamento e adequabilidade*. Actas do Seminário Internacional: Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos – Danos, processos e soluções. 2ª edição, LNEC, Lisboa, 2007.
- [17] GUERREIRO, Carlos; HENRIQUES, Fernando M. A.; PINTO, Ana Paula – *Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.



- [18] HENRIQUES, Fernando M. A. – *Fenómenos de higroscopicidade devidos à presença de sais solúveis*. Actas do 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios – PATORREB 2003, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [19] HENRIQUES, Fernando M. A. – *Humidade em paredes*. Colecção Edifícios nº1. 4ª edição, LNEC, Lisboa, 2007.
- [20] HENRIQUES, Fernando M. A.; RATO, Vasco Moreira – *Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade*. 3º ENCORE – Encontro sobre a Conservação e Reabilitação de Edifícios, LNEC, Lisboa, Maio 2003.
- [21] HENRIQUES, Fernando; RATO, Vasco Moreira; RODRIGUES, Maria Paulina – *Evaluation of salt resistant mortars*. 6<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Lisbon, 2003 (Cd-rom).
- [22] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. NP EN 459-1:2002.
- [23] IPQ – *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. NP EN 197-1:2001.
- [24] IPQ – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*. NP EN 933:1-2000.
- [25] IPQ – *Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da baridade e dos vazios*. NP EN 1097-3:2002.
- [26] IPQ – *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. NP EN 196-1:2006.
- [27] IPQ – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. NP EN 12370:2001.
- [28] LOURENÇO, Paulo; SOUSA, H. – *Concepção e projecto para alvenaria*. Seminário sobre paredes de alvenaria, Porto, 2002.

- [29] MAGALHÃES, Ana Cristian; VEIGA, Maria do Rosário; VELOSA, Ana Luísa – *Caracterização e avaliação do desempenho de possíveis soluções de argamassas para revestimentos de paredes de edifícios antigos* – 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [30] MENDONÇA, Lucinda Santos; RAMALHO, Marta Duarte – *Jogo de partículas*. Texto Editora, Lisboa, 1997.
- [31] OLIVEIRA, Sílvia *et al* – *Comportamento de argamassas e elementos de alvenaria antiga sujeitos à acção de sais* – 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [32] PAIVA, J. Vasconcelos; VEIGA, Maria do Rosário – *Aspectos gerais*. Curso de especialização sobre revestimentos de paredes. 5ª edição, LNEC, 2004.
- [33] PEREIRA, Tiago – *Optimização das características de humedecimento e secagem das argamassas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Especialidade de Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- [34] PINHO, Fernando F. S. – *Construções em alvenaria de pedra tradicional. Principais anomalias e técnicas de reabilitação*. Publicação UNIC/UNL, Lisboa, 2003.
- [35] PINHO, Fernando F. S. – *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade de Ciências da Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Outubro de 2007.
- [36] PINHO, Fernando F. S. – *Paredes de edifícios antigos em Portugal*. Colecção Edifícios nº8. 2ª edição, LNEC, Lisboa, 2000.
- [37] PINHO, Fernando F. S. – *Principais patologias em paredes de edifícios antigos*. REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa, 2000.

- [38] PINHO, Fernando F. S.; BAIÃO, Manuel F. C.; LÚCIO, Valter J. G. – *Experimental analyses of rubble stone masonry walls strengthened with reinforced lime and cement mortar rendering and transversal ties*. Challenges for Civil Construction 2008, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [39] PINHO, Fernando F. S. *et al* – *Experimental research on rubble stone masonry walls*. HMC08 - Historical Mortars Conference. Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility. LNEC, Lisboa, 2008.
- [40] PINTO, Ana Paula – *Conservação de pedras carbonatadas. Estudo e selecção de tratamentos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Maio de 2002.
- [41] RATO, Vasco Moreira – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento – Especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2006.
- [42] ROQUE, João C. Almendra – *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Setembro de 2002.
- [43] ROQUE, João C. Almendra; LOURENÇO, Paulo B. – *Reabilitação estrutural de parede antigas de alvenaria*. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa, Maio de 2003.
- [44] ROQUE, João C. Almendra; LOURENÇO, Paulo B. – *Técnicas de intervenção estrutural em edifícios antigos de alvenaria*. Instituto Politécnico de Bragança da Universidade do Minho.
- [45] SEQUEIRA, Ana Cristina; FRADE, Dina; GONÇALVES, Paulo – *Cal hidráulica. Um ligante para a reabilitação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Auditório FIL, Lisboa, 2007.
- [46] UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fe 01, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.

- [47] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fe 02, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [48] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fe 06, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999.
- [49] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fe 07, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [50] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fe 08, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [51] UNL/DEC – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da resistência à acção dos cloretos*. Fe 12, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999 (revisto).
- [52] UNL/DEC – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fe 15, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [53] UNL/DEC – *Análise de argamassas. Preparação dos provetes*. Fe 19, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996.
- [54] UNL/DEC – *Análise de argamassas. Determinação da consistência*. Fe 25, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1998.
- [55] UNL/DEC – *Análise de argamassas. Determinação da profundidade de carbonatação*. Fe 28, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999.
- [56] VEIGA, Maria do Rosário – *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Seminário “Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos”. Lisboa, LNEC, Fevereiro 2004.
- [57] VEIGA, Maria do Rosário *et al* – *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Coleção Edifícios nº9. LNEC, Lisboa, 2004.

- [58] VEIGA, Maria do Rosário *et al* – *Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings*. Historical Constructions, Guimarães, 2001.
- [59] VEIGA, Maria do Rosário; TAVARES, Martha – *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. Encontro: A indústria das tintas do século XXI. APTETI, Lisboa, Outubro de 2002.
- [60] Website: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Cloreto\\_de\\_s%C3%B3dio](http://pt.wikipedia.org/wiki/Cloreto_de_s%C3%B3dio), em Abril de 2009.
- [61] Website: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fenolftale%C3%ADna>, em Fevereiro de 2009.
- [62] Website: <http://www.cimpor-portugal.pt/cache/bin/XPQLYeQXX513rayzg5JXIPZKU.pdf> – Ficha técnica sobre o cimento Portland de calcário CEM II / B-L 32,5 N, em 12 de Janeiro de 2010.
- [63] Website: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/050808.pdf>, em 12 Janeiro de 2010.
- [64] Website: <http://www.secilmartinganca.pt/docs/FTec%20Cal%20Hidraulica.pdf> – Ficha técnica sobre a cal hidráulica, em 12 de Janeiro de 2010.



**ANEXO I**  
**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**  
**DOS PROJETOS DE ARGAMASSA**





## 1 – Considerações iniciais

Neste anexo apresentam-se os resultados das características físicas dos materiais utilizados na preparação das argamassas de cal aérea (CA), bastarda de cal hidráulica e cal aérea (CH) e bastarda de cimento e cal aérea (CI) e das características mecânicas, físicas e químicas de todos os provetes de argamassa ensaiados, referidos no Capítulo III deste trabalho. Apresenta-se também o valor médio e o desvio padrão dos valores obtidos nas várias características ensaiadas para cada tipo de argamassa estudado.

## 2 – Caracterização dos constituintes das argamassas

### 2.1 – Características físicas

#### – Análise granulométrica das areias

Nas tabelas I.1 e I.2 apresentam-se os resultados médios obtidos nas três amostras ensaiadas de cada areia utilizada na análise granulométrica.

Tabela I.1 – Análise granulométrica da areia de rio

Peneiros		Retido		Passado	Retido
Designação	Abertura [mm]	[g]	[%]	Acumulado [%]	Acumulado [%]
1"1/2	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52			100,0	
nº 4	4,76	0,0	0,0	100,0	0,0
nº 8	2,38	18,1	1,8	98,2	1,8
nº 16	1,19	116,1	11,6	86,6	13,4
nº 30	0,595	367,0	36,7	49,9	50,1
nº 50	0,297	396,7	39,7	10,2	89,8
nº 100	0,149	90,2	9,0	1,2	98,8
nº 200	0,075	7,8	0,8	0,4	-
refugo	-	3,2	0,3	0,1	-
Total		999,1	100,0		253,9
Módulo de finura					2,5
Máxima dimensão do agregado (D) = 2,38 mm; Mínima dimensão do agregado (d) = 0,149 mm					

Tabela I.2 – Análise granulométrica da areia de areeiro

Peneiros		Retido		Passado	Retido
Designação	Abertura [mm]	[g]	[%]	Acumulado [%]	Acumulado [%]
1"1/2	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52			100,0	
nº 4	4,76	0,0	0,0	100,0	0,0
nº 8	2,38	0,4	0,04	100,0	0,0
nº 16	1,19	1,2	0,12	99,8	0,2
nº 30	0,595	26,3	2,6	97,2	2,8
nº 50	0,297	726,2	72,6	24,6	75,4
nº 100	0,149	204,9	20,5	4,1	95,9
nº 200	0,075	31,3	3,1	1,0	-
refugo	-	9,4	0,9	0,1	-
Total		999,7	100,0		174,2
Módulo de finura					1,7
Máxima dimensão do agregado (D) = 0,595 mm; Mínima dimensão do agregado (d) = 0,149 mm					

### – Baridade das areias e dos ligantes

Nas tabelas I.3 a I.7 apresentam-se os resultados de cada amostra das areias e dos ligantes usados na preparação das argamassas.

Tabela I.3 – Valores de baridade de cada amostra de areia de rio

Amostra	Volume do recipiente [cm³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m³]
1	750	1040,8	1387,7
2		1047,7	1396,9
3		1046,3	1395,1
Média			<b>1393,2</b>
Desvio padrão			<b>4.9</b>

Tabela I.4 – Valores de baridade de cada amostra de areia de areeiro

Amostra	Volume do recipiente [cm³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m³]
1	750	1028,4	1371,2
2		1027,3	1369,7
3		1033,1	1377,5
Média			1372,8
Desvio padrão			4.1

Tabela I.5 – Valores de baridade de cada amostra de cal aérea

Amostra	Volume do recipiente [cm³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m³]
1	750	215,9	287,9
2		220,6	294,1
3		217,4	289,9
Média			290,6
Desvio padrão			3.2

Tabela I.6 – Valores de baridade de cada amostra de cal hidráulica

Amostra	Volume do recipiente [cm³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m³]
1	750	626,8	835,7
2		625,0	833,3
3		632,5	843,3
Média			837,5
Desvio padrão			5,2

Tabela I.7 – Valores de baridade de cada amostra de cimento

Amostra	Volume do recipiente [cm³]	Massa da amostra [g]	Baridade [kg/m³]
1	750	699,1	932,1
2		701,7	935,6
3		692,2	922,9
Média			930,2
Desvio padrão			6.5

### 3 – Caracterização das argamassas

#### 3.1 – Argamassas frescas

##### – Ensaio de consistência por espalhamento

Na tabela I.8 apresenta-se os resultados no ensaio de consistência por espalhamento das argamassas CA, CH e CI.

Tabela I.8 – Valores obtidos no ensaio de consistência por espalhamento das argamassas CA, CH e CI

Provete <sup>1)</sup>	Amassadura	Data do ensaio	Ensaio de consistência [cm]					Espalhamento médio [%]
			d1	d2	d3	d4	d med	
CA	1 <sup>a</sup>	20-01-09	---	---	---	---	20,5 <sup>2)</sup>	105
	2 <sup>a</sup>		16,6	17,0	17,0	16,8	16,9	69
CH	1 <sup>a</sup>		17,0	16,7	17,7	18,0	17,4	74
	2 <sup>a</sup>		15,8	16,2	16,9	17,1	16,5	65
CI	1 <sup>a</sup>		18,2	18,3	18,7	18,7	18,5	85
	2 <sup>a</sup>		17,8	18,1	17,7	17,6	17,8	78

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

<sup>2)</sup> Este valor foi logo calculado

#### 3.2 – Argamassas endurecidas

Os provetes de argamassa CA, CH e CI foram pesados previamente à realização do ensaio de profundidade de carbonatação aos 30 dias de idade, à primeira série de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas entre os 83 e 90 dias de idade e à segunda série de ensaios de caracterização das argamassas endurecidas aos 160 dias de idade dos provetes. Os valores das pesagens estão indicados nas tabelas I.9 a I.11.

Tabela I.9 – Massas dos provetes de argamassa CA7 e CA8 (1ª série) aos 30 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data	Idade	Massa [g]	Média [g]	Desvio padrão [g]
CA7	19-02-09	30 d	426,7	426,5	0,3
CA8			426,3		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia

Tabela I.10 – Massas dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data	Idade	Massa [g]	Média [g]	Desvio padrão [g]
CA1	13-04-09	83 d	421,1	426,8	4,1
CA2			425,9		
CA3			425,7		
CA4			433,6		
CA5			425,6		
CA6			428,6		
CH1			433,9	432,2	1,8
CH2			431,2		
CH3			434,6		
CH4			432,0		
CH5			429,8		
CH6			431,6		
CI1			442,8	441,4	2,1
CI2			439,4		
CI3			443,9		
CI4			438,4		
CI5			441,7		
CI6			442,1		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela I.11 – Massas dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 160 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data	Idade	Massa [g]	Média [g]	Desvio padrão [g]
CA12	29-06-09	160 d	400,9	403,2	0,2
CA13			404,0		
CA14			404,7		
CH7			439,9	437,4	2,5
CH8			437,4		
CH9			434,9		
CI7			447,9	445,5	5,2
CI8			451,6		
CI9			441,2		
CI10			441,2		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

### 3.2.1 – Características mecânicas

#### – Módulo de elasticidade dinâmico

Nas tabelas I.12 e I.13 indicam-se os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico aos 83 dias (1ª série) e aos 160 dias de idade (2ª série) nos provetes de argamassa CA, CH e CI.

Tabela I.12 – Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade	Massa do provete [g]	E1 [MPa] (1ª leitura)	E2 [MPa] (2ª leitura)	E [MPa]	E <sub>med</sub> [MPa]	Desvio padrão [MPa]
CA1	13-04-09	83 d	421,1	3101	3108	3105	3193	59
CA2			425,9	3167	3175	3171		
CA3			425,7	3198	3200	3199		
CA4			433,6	3237	3248	3243		
CA5			425,6	3175	3160	3168		
CA6			428,6	3277	3266	3272		
CH1			433,9	2078	2064	2071	1869	129
CH2			431,2	1742	1768	1755		
CH3			434,6	1979	1962	1971		
CH4			432,0	1834	1799	1817		
CH5			429,8	1748	1730	1739		
CH6			431,6	1903	1824	1864		
CI1			442,8	4141	4151	4146	4167	109
CI2			439,4	4030	3950	3990		
CI3			443,9	4284	4159	4222		
CI4			438,4	4280	4219	4250		
CI5			441,7	4081	4136	4109		
CI6			442,1	4285	4287	4286		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela I.13 – Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade	Massa do provete [g]	E1 [MPa] (1ª leitura)	E2 [MPa] (2ª leitura)	E [MPa]	E <sub>med</sub> [MPa]	Desvio padrão [MPa]
CA12	29-06-09	163 d	400,9	2476	2487	2482	2454	28
CA13			404,4	2422	2430	2426		
CA14			404,7	2462	2449	2456		
CH7			439,9	2281	2297	2289	2066	209
CH8			437,4	2039	2031	2035		
CH9			434,9	1883	1865	1874		
CI7			447,9	4768	4746	4757	4637	381
CI8			451,6	5109	5126	5118		
CI9			441,2	4256	4281	4269		
CI10			441,2	4411	4400	4406		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

**– Resistências à tracção por flexão e resistência à compressão**

Nas tabelas I.14 e I.15 indicam-se os valores obtidos nos ensaios de resistência à tracção por flexão e resistência à compressão aos 83 dias (1ª série) e aos 162 dias de idade (2ª série) para os provetes de argamassa CA, CH e CI.

Tabela I.14 – Resistências à tracção por flexão e à compressão dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 83 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade	Massa do provete [g]	Resistência à tracção por flexão				Resistência à compressão			
				Força [N]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_{med}$ [MPa]	DP [MPa]	Força [N]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_{med}$ [MPa]	DP [MPa]
CA1	13-04-09	83 d	421,1	128,0	0,3	0,2	0,1	1280,0	0,8	0,8	0,1
CA2			425,9	42,7	0,1			1280,0	0,8		
CA3			425,7	128,0	0,3			1120,0	0,7		
CH1			433,9	42,7	0,1	0,2	0,1	1120,0	0,7	0,6	0,1
CH2			431,2	128,0	0,3			960,0	0,6		
CH3			434,6	42,7	0,1			960,0	0,6		
CI1			442,8	341,3	0,8	0,7	0,1	3680,0	2,3	2,2	0,1
CI2			439,4	298,7	0,7			3360,0	2,1		
CI3			443,9	298,7	0,7			3520,0	2,2		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela I.15 – Resistências à tracção por flexão e à compressão dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade	Massa do provete [g]	Resistência à tracção por flexão				Resistência à compressão			
				Força [N]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_{med}$ [MPa]	DP [MPa]	Força [N]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_{med}$ [MPa]	DP [MPa]
CA12	01-07-09	163 d	400,9	128,0	0,3	0,3	0,0	960,0	0,6	0,5	0,1
CA13			404,0	128,0	0,3			800,0	0,5		
CA14			404,7	128,0	0,3			800,0	0,5		
CH7			439,9	128,0	0,3	0,2	0,1	960,0	0,6	0,7	0,1
CH8			437,4	128,0	0,3			1120,0	0,7		
CH9			434,9	42,7	0,1			1120,0	0,7		
CI7			447,9	341,3	0,8	0,9	0,1	3680,0	2,3	2,4	0,3
CI8			451,6	426,7	1,0			4480,0	2,8		
CI9			441,2	341,3	0,8			3680,0	2,3		
CI10			441,2	341,3	0,8			3360,0	2,1		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

### 3.2.2 – Características físicas

#### – Variações dimensionais lineares

Nas tabelas I.16 e I.17 indicam-se os valores obtidos nos ensaios de variações dimensionais lineares dos provetes de argamassa CA, CH e CI utilizados na 1ª e 2ª séries de ensaio, respectivamente.

Tabela I.16 – Variações dimensionais lineares dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série)

Provete	Data do ensaio	Idade [dias]	Variação Dimensional Linear [mm/m]		
			Média CA	Média CH	Média CI
Moldado	20-01-09	0	0,00	0,00	0,00
	21-01-09	1	-0,86	-4,17	-0,21
	22-01-09	2	-1,72	-4,95	-0,73
	23-01-09	3	-2,07	-4,64	-0,73
	24-01-09	4	-2,27	-5,10	-0,73
	25-01-09	5	-2,27	-5,16	-0,73
	26-01-09	6	-2,19	-5,16	-1,04
	27-01-09	7	-2,11	-5,26	-0,99
Desmoldado	05-02-09	16	-4,84	-8,13	-3,02
	10-02-09	21	-7,11	-10,10	-3,96
	17-02-09	28	-7,50	-10,42	-4,69
	25-02-09	36	-8,75	-10,73	-4,79
	04-03-09	43	-8,33	-10,83	-4,48
	11-03-09	50	-8,33	-10,83	-4,58
	18-03-09	57	-8,33	-10,83	-4,58
	24-03-09	63	-8,33	-10,83	-4,69
	01-04-09	71	-8,33	-10,83	-4,69
	07-04-09	77	-8,33	-10,83	-4,69

1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela I.17 – Variações dimensionais lineares dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série)

Provete	Data do ensaio	Idade [dias]	Variação Dimensional Linear [mm/m]		
			Média CA	Média CH	Média CI
Moldado	20-01-09	0	0,00	0,00	0,00
	21-01-09	1	-5,21	0,00	-3,59
	22-01-09	2	-6,25	-0,94	-1,80
	23-01-09	3	-6,25	-1,46	-2,50
	24-01-09	4	-6,35	-1,88	-2,58
	25-01-09	5	-6,77	-2,71	-2,73
	26-01-09	6	-5,21	-2,92	-2,73
	27-01-09	7	-5,21	-2,40	-2,81
Desmoldado	05-02-09	16	-7,29	-2,71	-5,47
	10-02-09	21	-10,83	-5,62	-7,81
	17-02-09	28	-10,42	-6,46	-7,81
	25-02-09	36	-10,83	-6,87	-7,50
	04-03-09	43	-10,42	-6,46	-7,34
	11-03-09	50	-10,83	-6,46	-7,34
	18-03-09	57	-10,83	-6,46	-7,34
	24-03-09	63	-11,88	-6,46	-7,66
	01-04-09	71	-11,88	-6,46	-7,66
	07-04-09	77	-11,88	-6,46	-7,66

1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

**– Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta**

Nas tabelas I.18 e I.19 indicam-se os valores da massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta aos 90 dias (1ª série) e aos 163 dias de idade (2ª série) obtidos nos provetes de argamassa CA, CH e CI.

Tabela I.18 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 90 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa do provete [g]			MVR			MVA			PA		
			M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Média	DP	[kg/m <sup>3</sup> ]	Média	DP	[%]	Média	DP
			T=60° C	T=25° C <sup>2)</sup>										
CA1 - 1	20 a 23-04-09	90 d	54,741	33,744	65,453	2607,1	2593,7	16,0	1726,4	1714,1	16,7	33,8	33,9	0,3
CA1 - 2			20,213	12,406	24,268	2589,1			1704,0			34,2		
CA2 - 1			52,935	32,560	63,460	2598,0			1713,1			34,1		
CA2 - 2			58,444	35,986	69,640	2602,4			1736,6			33,3		
CA3 - 1			55,635	34,254	66,682	2602,1			1715,6			34,1		
CA3 - 2			54,877	33,469	65,958	2563,4			1689,1			34,1		
CH1 - 1			54,222	33,436	64,450	2608,6	2617,6	7,5	1748,3	1737,6	9,3	33,0	33,7	0,4
CH1 - 2			43,619	26,942	52,179	2615,5			1728,4			33,9		
CH2 - 1			72,489	44,878	86,604	2625,4			1737,3			33,8		
CH2 - 2			53,014	32,733	63,410	2614,0			1728,1			33,9		
CH3 - 1			68,453	42,370	81,843	2624,4			1734,2			33,9		
CH3 - 2			42,294	26,195	50,374	2627,1			1749,2			33,4		
CI1 - 1			71,663	44,264	85,403	2615,5	2622,1	7,5	1742,0	1741,1	9,3	33,4	33,6	0,4
CI1 - 2			56,395	34,799	67,212	2611,4			1739,9			33,4		
CI2 - 1			72,788	45,107	87,307	2629,5			1724,8			34,4		
CI2 - 2			48,930	30,294	58,408	2625,6			1740,4			33,7		
CI3 - 1			66,953	41,480	79,792	2628,4			1747,6			33,5		
CI3 - 2			63,105	39,079	75,097	2626,5			1752,0			33,3		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

<sup>2)</sup> Temperatura ambiente

<sup>3)</sup> DP – desvio padrão

Tabela I.19 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa do provete [g]			MVR			MVA			PA		
			M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Média	DP	[kg/m <sup>3</sup> ]	Média	DP	[%]	Média	DP
			T=60° C	T=25° C <sup>2)</sup>										
CA12 - 1	02 a 05-07-09	163 d	63,002	38,751	76,567	2597,9	2590,8	12,3	1666,0	1667,8	8,4	35,9	35,6	0,3
CA12 - 2			37,314	22,968	45,434	2601,0			1660,9			36,1		
CA13 - 1			50,841	31,190	61,559	2587,2			1674,1			35,3		
CA13 - 2			48,872	29,838	59,327	2567,6			1657,3			35,5		
CA14 - 1			59,728	36,721	72,273	2596,1			1680,0			35,3		
CA14 - 2			49,717	30,558	60,355	2595,0			1668,5			35,7		



Tabela I.19 (continuação) – Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série) aos 163 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa do provete [g]			MVR			MVA			PA		
			M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	[kg/m³]	Média	DP	[kg/m³]	Média	DP	[%]	Média	DP
CH7 - 1	02 a 05-07-09	163 d	60,604	37,453	71,948	2617,8	2624,4	4,2	1756,9	1760,1	4,9	32,9	32,9	0,2
CH7 - 2			61,105	37,844	72,640	2626,9			1756,1			33,2		
CH8 - 1			20,618	12,774	24,509	2628,5			1757,0			33,2		
CH8 - 2			56,998	35,284	67,617	2624,9			1762,8			32,8		
CH9 - 1			59,467	36,833	70,453	2627,3			1768,8			32,7		
CH9 - 2			53,875	33,319	63,952	2620,9			1758,7			32,9		
CI7 - 1			61,666	38,133	72,648	2620,4	2621,4	8,2	1786,6	1771,7	13,2	31,8	32,4	0,4
CI7 - 2			57,003	35,287	67,410	2624,9			1774,5			32,4		
CI8 - 1			61,479	38,086	72,511	2628,1			1785,9			32,0		
CI8 - 2			67,271	41,633	79,569	2623,9			1773,3			32,4		
CI9 - 1			59,165	36,427	70,326	2602,0			1745,3			32,9		
CI9 - 2			58,772	36,353	69,626	2621,5			1766,4			32,6		
CI10 - 1			59,912	37,108	70,846	2627,3			1775,8			32,4		
CI10 - 2			58,271	36,055	69,060	2622,9			1765,5			32,7		

1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

2) Temperatura ambiente

3) DP – desvio padrão

### – Absorção de água por capilaridade

Nas tabelas I.20, I.22 e I.24 indicam-se os valores da quantidade de água absorvida em cada provete e, nas tabelas I.21, I.23 e I.25, os resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade e dos valores assintóticos aos 90 dias de idade (1ª série) obtidos nos provetes de argamassa CA, CH e CI.

Tabela I.20 – Registo de massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa CA (1ª série) aos 90 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Quantidades absorvidas [kg/m²]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CA1	CA2	CA3	CA1	CA2	CA3	CA1 a CA3
20-04-09	t = 0 (13h30)	0,0	0,00	210,383	215,331	211,753	0,00	0,00	0,00	0,00
	t = 5 min	0,08	0,29	217,421	223,050	219,044	4,40	4,82	4,56	4,59
	t = 15 min	0,25	0,50	221,193	227,043	222,767	6,76	7,32	6,88	6,99
	t = 30 min	0,5	0,71	224,720	230,585	226,336	8,96	9,53	9,11	9,20
	t = 1 h	1,0	1,00	229,397	235,325	231,029	11,88	12,50	12,05	12,14
	t = 3 h	3,0	1,73	233,438	239,010	234,860	14,41	14,80	14,44	14,55
	t = 6 h	6,0	2,45	233,757	239,354	235,171	14,61	15,01	14,64	14,75
1 d	21-04-09 (13h30)	24,0	4,90	234,035	239,611	235,480	14,78	15,18	14,83	14,93
2 d	22-04-09 (13h30)	48,0	6,93	234,240	239,797	235,674	14,91	15,29	14,95	15,05
3 d	23-04-09 (13h30)	72,0	8,49	234,346	239,957	235,769	14,98	15,39	15,01	15,13

1) CA: cal aérea e areia

Tabela I.21 – Resultados do coeficiente de absorção e do valor assintótico dos provetes de argamassa CA (1ª série) aos 90 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Idade	Coef. absorção [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	Valor assímtótico [kg/m²]
CA1	90 d	11,88	14,98
CA2		12,50	15,39
CA3		12,05	15,01
Média		<b>12,14</b>	<b>15,13</b>
Desvio padrão		<b>0.32</b>	<b>0.23</b>

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia

Tabela I.22 – Registo de massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa CH (1ª série) aos 90 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Quantidades absorvidas [kg/m <sup>2</sup> ]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CH1	CH2	CH3	CH1	CH2	CH3	
20-04-09	t = 0 (13h30)	0,0	0,00	220,885	204,606	223,131	0,00	0,00	0,00	0,00
	t = 5 min	0,08	0,29	228,008	212,699	230,991	4,45	5,06	4,91	4,81
	t = 15 min	0,25	0,50	232,291	217,974	235,855	7,13	8,36	7,95	7,81
	t = 30 min	0,5	0,71	236,565	223,026	240,688	9,80	11,51	10,97	10,76
	t = 1 h	1,0	1,00	242,801	229,025	247,589	13,70	15,26	15,29	14,75
	t = 3 h	3,0	1,73	246,340	229,333	249,745	15,91	15,45	16,63	16,00
	t = 6 h	6,0	2,45	246,813	229,686	250,195	16,21	15,68	16,92	16,27
1 d	21-04-09 (13h30)	24,0	4,90	247,559	230,320	250,881	16,67	16,07	17,34	16,70
2 d	22-04-09 (13h30)	48,0	6,93	248,038	230,722	251,319	16,97	16,32	17,62	16,97
3 d	23-04-09 (13h30)	72,0	8,49	248,266	230,970	251,640	17,11	16,48	17,82	17,14

<sup>1)</sup> CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

Tabela I.23 – Resultados do coeficiente de absorção e do valor assintótico dos provetes de argamassa CH (1ª série) aos 90 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Idade	Coef. absorção [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	Valor assímtótico [kg/m²]
CH1	90 d	13,70	17,11
CH2		15,26	16,48
CH3		15,29	17,82
Média		14,75	17,14
Desvio padrão		0.91	0.67

<sup>1)</sup> CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

Tabela I.24 – Registo de massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa CI (1ª série) aos 90 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Quantidades absorvidas [kg/m <sup>2</sup> ]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CI1	CI2	CI3	CI1	CI2	CI3	
20-04-09	t = 0 (13h30)	0,0	0,00	210,175	221,241	214,784	0,00	0,00	0,00	0,00
	t = 5 min	0,08	0,29	216,080	227,285	220,158	3,69	3,78	3,36	3,61
	t = 15 min	0,25	0,50	220,135	231,217	223,883	6,22	6,24	5,69	6,05
	t = 30 min	0,5	0,71	223,772	234,742	227,291	8,50	8,44	7,82	8,25

Tabela I.24 (continuação) – Registo de massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa CI (1ª série) aos 90 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Quantidades absorvidas [kg/m²]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CI1	CI2	CI3	CI1	CI2	CI3	
20-04	t = 1 h	1,0	1,00	228,525	239,376	231,736	11,47	11,33	10,60	11,13
	t = 3 h	3,0	1,73	235,053	246,803	239,134	15,55	15,98	15,22	15,58
	t = 6 h	6,0	2,45	235,560	247,451	239,795	15,87	16,38	15,63	15,96
1 d	21-04-09 (13h30)	24,0	4,90	235,895	247,880	240,262	16,08	16,65	15,92	16,22
2 d	22-04-09 (13h30)	48,0	6,93	236,136	248,127	240,526	16,23	16,80	16,09	16,37
3 d	23-04-09 (13h30)	72,0	8,49	236,288	248,284	240,679	16,32	16,90	16,18	16,47

1) CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela I.25 – Resultados do coeficiente de absorção e do valor assintótico dos provetes de argamassa CI (1ª série) aos 90 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Idade	Coef. absorção [kg/m².h <sup>1/2</sup> ]	Valor assímtótico [kg/m²]
CI1	90 d	11,47	16,32
CI2		11,33	16,90
CI3		10,60	16,18
Média		<b>11,13</b>	<b>16,47</b>
Desvio padrão		<b>0.47</b>	<b>0.38</b>

1) CI: cimento, cal aérea e areia

### – Ensaio de secagem

Nas tabelas I.26, I.28 e I.30 indicam-se os registos de massas durante o ensaio de secagem e os respectivos valores de teor de água em cada provete e, nas tabelas I.27, I.29 e I.31 os valores de índice de secagem aos 108 dias de idade (1ª série) dos provetes de argamassa CA, CH e CI.

Tabela I.26 – Registo de massas durante o ensaio de secagem dos provetes de argamassa CA (1ª série) aos 108 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Teor de Água [%]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CA1	CA2	CA3	CA1	CA2	CA3	
08-05-09	t = 0 (13h30)	0,0	0,00	236,137	241,928	237,822	11,804	11,912	11,879	11,865
	t = 5 min	0,08	0,29	235,949	241,658	237,544	11,715	11,787	11,749	11,750
	t = 15 min	0,25	0,50	235,838	241,597	237,446	11,662	11,759	11,702	11,708
	t = 30 min	0,5	0,71	235,623	241,365	237,191	11,560	11,652	11,583	11,598
	t = 1 h	1,0	1,00	235,200	240,937	236,783	11,360	11,454	11,391	11,401
	t = 3 h	3,0	1,73	233,730	239,428	235,226	10,664	10,756	10,658	10,693
	t = 6 h	6,0	2,45	231,492	237,051	232,668	9,604	9,656	9,455	9,572
1 d	09-05-09 (12h)	24,0	4,90	219,653	224,538	220,014	3,999	3,868	3,502	3,789
2 d	10-05-09 (12h)	48,0	6,93	211,825	216,708	212,984	0,293	0,246	0,195	0,244
3 d	11-05-09 (12h)	72,0	8,48	211,133	216,095	212,487	-0,035	-0,038	-0,039	-0,037
4 d	12-05-09 (12h)	96,0	9,80	211,166	216,133	212,524	-0,019	-0,020	-0,022	-0,020
5 d	13-05-09 (12h)	120,0	10,95	211,214	216,168	212,562	0,003	-0,004	-0,004	-0,002
6 d	14-05-09 (12h)	144,0	12,00	211,227	216,193	212,582	0,009	0,007	0,006	0,008
7 d	15-05-09 (12h)	168,0	12,96	211,218	216,184	212,575	0,005	0,003	0,002	0,004
8 d	16-05-09 (12h)	192,0	13,86	211,241	216,201	212,592	0,016	0,011	0,010	0,013

1) CA: cal aérea e areia

Tabela I.27 – Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa CA (1ª série) aos 108 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Idade	Índice de secagem
CA1	108 d	0,023
CA2		0,022
CA3		0,019
Média		<b>0,021</b>
Desvio padrão		<b>0.002</b>

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia

Tabela I.28 – Registo de massas durante o ensaio de secagem dos provetes de argamassa CH (1ª série) aos 108 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Teor de Água [%]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CH1	CH2	CH3	CH1	CH2	CH3	CH1 a CH3
08-05-09	t = 0 (13h30)	0,0	0,00	250,356	232,913	253,684	12,808	13,310	13,155	13,091
	t = 5 min	0,08	0,29	250,109	232,664	253,480	12,697	13,189	13,064	12,983
	t = 15 min	0,25	0,50	249,992	232,502	253,306	12,644	13,110	12,986	12,914
	t = 30 min	0,5	0,71	249,733	232,284	253,046	12,527	13,004	12,870	12,801
	t = 1 h	1,0	1,00	249,288	231,909	252,588	12,327	12,822	12,666	12,605
	t = 3 h	3,0	1,73	247,706	230,582	250,929	11,614	12,176	11,926	11,905
	t = 6 h	6,0	2,45	245,322	228,573	248,445	10,540	11,199	10,818	10,852
1 d	09-05-09 (12h)	24,0	4,90	232,288	217,389	234,892	4,667	5,758	4,773	5,066
2 d	10-05-09 (12h)	48,0	6,93	223,351	207,318	225,647	0,640	0,859	0,649	0,716
3 d	11-05-09 (12h)	72,0	8,48	222,170	205,796	224,419	0,108	0,118	0,101	0,109
4 d	12-05-09 (12h)	96,0	9,80	222,082	205,692	224,338	0,068	0,068	0,065	0,067
5 d	13-05-09 (12h)	120,0	10,95	222,056	205,662	224,310	0,056	0,053	0,053	0,054
6 d	14-05-09 (12h)	144,0	12,00	222,025	205,636	224,284	0,042	0,040	0,041	0,041
7 d	15-05-09 (12h)	168,0	12,96	221,978	205,591	224,233	0,021	0,018	0,018	0,019
8 d	16-05-09 (12h)	192,0	13,86	221,996	205,608	224,255	0,029	0,027	0,028	0,028

<sup>1)</sup> CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

Tabela I.29 – Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa CH (1ª série) aos 108 dias de idade

Provete <sup>1)</sup>	Idade	Índice de secagem
CH1	108 d	0,026
CH2		0,031
CH3		0,026
Média		<b>0,028</b>
Desvio padrão		<b>0,003</b>

<sup>1)</sup> CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

Tabela I.30 – Registo de massas durante o ensaio de secagem dos provetes de argamassa CI (1ª série) aos 108 dias de idade

Data do ensaio		Tempo		Massa do provete [g]			Teor de Água [%]			Média
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	CI1	CI2	CI3	CI1	CI2	CI3	CI1 a CI3
08-05-09	t = 0 (13h30)	0,0	0,00	237,494	249,380	241,874	11,637	11,352	11,244	11,411
	t = 5 min	0,08	0,29	237,237	249,146	241,623	11,517	11,247	11,128	11,297
	t = 15 min	0,25	0,50	237,074	248,962	241,436	11,440	11,165	11,042	11,216
	t = 30 min	0,5	0,71	236,822	248,707	241,203	11,321	11,051	10,935	11,103
	t = 1 h	1,0	1,00	236,415	248,271	240,776	11,130	10,857	10,739	10,908
	t = 3 h	3,0	1,73	234,950	246,699	239,207	10,442	10,155	10,017	10,204
	t = 6 h	6,0	2,45	232,702	244,353	236,880	9,385	9,107	8,947	9,146
1 d	09-05-09 (12h)	24,0	4,90	223,083	234,411	227,322	4,863	4,668	4,551	4,694
2 d	10-05-09 (12h)	48,0	6,93	217,636	228,921	222,213	2,303	2,216	2,201	2,240
3 d	11-05-09 (12h)	72,0	8,48	215,167	226,415	219,770	1,142	1,098	1,078	1,106
4 d	12-05-09 (12h)	96,0	9,80	213,959	225,177	218,585	0,574	0,545	0,533	0,551
5 d	13-05-09 (12h)	120,0	10,95	213,290	224,509	217,954	0,260	0,246	0,242	0,250
6 d	14-05-09 (12h)	144,0	12,00	213,025	224,250	217,700	0,135	0,131	0,126	0,131
7 d	15-05-09 (12h)	168,0	12,96	212,811	224,032	217,497	0,035	0,033	0,032	0,033
8 d	16-05-09 (12h)	192,0	13,86	212,785	224,008	217,477	0,023	0,023	0,023	0,023

1) CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela I.31 – Resultados do índice de secagem dos provetes de argamassa CI (1ª série) aos 108 dias de idade

Proвете <sup>1)</sup>	Idade	Índice de secagem
CI1	108 d	0,038
CI2		0,038
CI3		0,038
Média		<b>0,038</b>
Desvio padrão		<b>0,000</b>

1) CI: cimento, cal aérea e areia

### 3.2.3 – Características químicas

#### – Profundidade de carbonatação

Na tabela I.32 representam-se os valores correspondentes à média das leituras das quatro faces dos provetes de argamassa CA7 e CA8, realizadas aos 30, 63 e 90 dias de idade.

Tabela I.32 – Profundidade de carbonatação dos provetes CA7 e CA8

Provetes <sup>1)</sup>	Data	Idade	Profundidade de Carbonatação		
			Média [mm]		Média [%]
CA7	19-02-2009	30 d	7,3	7,5	37,5
CA8			7,8		
CA7	24-03-2009	63 d	10,8	11,2	55,9
CA8			11,6		
CA7	20-04-2009	90 d	18,1	18,5	92,5
CA8			18,9		

1) CA: cal aérea e areia



## **ANEXO II**

### **RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS FACE AOS SAIS SOLÚVEIS**





## 1 – Considerações iniciais

Neste anexo apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência das argamassas de cal aérea (CA), bastarda de cal hidráulica e cal aérea (CH) e bastarda de cimento e cal aérea (CI), face à acção dos sais solúveis (cloretos e sulfatos) referidos no Capítulo IV deste trabalho. Apresenta-se também o valor médio e o desvio padrão dos valores obtidos nas várias características ensaiadas para cada tipo de argamassa estudado.

## 2 – Ensaio de durabilidade face aos sais solúveis

Os provetes de argamassa CA, CH e CI foram pesados previamente à realização dos ensaios de resistência aos cloretos (1ª e 2ª séries) e aos sulfatos (1ª série). Os valores das pesagens estão indicados nas tabelas II.1 a II.3.

Tabela II.1 – Massa seca dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 94 dias de idade, antes do ensaio de resistência aos cloretos

Proвете <sup>1)</sup>	Data	Idade [dias]	Massa seca [g]	Média [g]	Desvio padrão [g]
CA4-1	24-04-09	94	223,894	213,158	9,317
CA5-1			207,192		
CA6-1			208,388		
CH4-1			211,470	209,696	3,140
CH5-1			206,071		
CH6-1			211,548		
CI4-1			231,842	221,150	10,062
CI5-1			219,744		
CI6-1			211,865		

1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela II.2 – Massa seca dos provetes de argamassa CA, CH, CI (2ª série) aos 164 dias de idade, antes do ensaio de resistência aos cloretos

Proвете <sup>1)</sup>	Data	Idade [dias]	Massa seca [g]	Média [g]	Desvio padrão [g]
CA12	03-07-09	164	189,282	198,094	8,357
CA13			205,906		
CA14			199,095		
CH7			212,880	220,258	7,578
CH8			228,021		
CH9			219,873		
CI7			227,327	219,875	5,752
CI8			214,013		
CI9			217,066		
CI10			221,094		

1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Tabela II.3 – Massa seca dos provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série) aos 95 dias de idade, antes do ensaio de resistência aos sulfatos

Provete <sup>1)</sup>	Data	Idade [dias]	Massa seca [g]	Média [g]	Desvio padrão [g]
CA4-2	25-04-09	95	208,408	214,875	5,633
CA5-2			217,503		
CA6-2			218,714		
CH4-2			220,016	220,945	2,150
CH5-2			223,403		
CH6-2			219,416		
CI4-2			206,475	219,456	11,980
CI5-2			221,804		
CI6-2			230,088		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

## 2.1 – Resistência aos cloretos

Previamente à colocação dos provetes na câmara climática determinou-se a percentagem de cloretos retidos em cada provete ensaiado em ambas as séries. Os valores apresentam-se nas tabelas II.4 e II.5.

Tabela II.4 – Valores de cloretos retidos em todos os provetes de argamassa CA, CH e CI (1ª série)

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa seca M <sub>0</sub> [g]	Massa seca após solução M <sub>1</sub> [g]	Massa Cl <sup>-</sup> retidos [g]	Média [g]	DP [g]	Cl <sup>-</sup> retidos [%]	Média [%]	DP [%]
CA4-1	24-04 a 04-05-09	94 d	223,894	231,046	7,2	6,9	0,2	3,2	3,3	0,1
CA5-1			207,192	214,163	7,0			3,4		
CA6-1			208,388	215,106	6,7			3,2		
CH4-1			211,470	218,815	7,3	7,3	0,2	3,5	3,5	0,0
CH5-1			206,071	213,148	7,1			3,4		
CH6-1			211,548	218,895	7,3			3,5		
CI4-1			231,842	240,373	8,5	8,0	0,6	3,7	3,6	0,1
CI5-1			219,744	227,877	8,1			3,7		
CI6-1			211,865	219,266	7,4			3,5		

<sup>1)</sup> CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

<sup>2)</sup> DP – desvio padrão

Tabela II.5 – Valores de cloretos retidos em todos os provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série)

Provete <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa seca M <sub>0</sub> [g]	Massa seca após solução M <sub>1</sub> [g]	Massa Cl <sup>-</sup> retidos [g]	Média [g]	DP [g]	Cl <sup>-</sup> retidos [%]	Média [%]	DP [%]
CA12	03-07 a 18-07-09	164 d	189,282	196,761	7,5	8,0	0,5	4,0	4,1	0,1
CA13			205,906	214,298	8,4			4,1		
CA14			199,095	207,352	8,3			4,1		
CH7			212,880	226,939	14,1	15,6	1,3	6,6	7,1	0,4
CH8			228,021	244,380	16,4			7,2		
CH9			219,873	236,192	16,3			7,4		

Tabela II.5 (continuação) – Valores de cloretos retidos em todos os provetes de argamassa CA, CH e CI (2ª série)

Proвете <sup>1)</sup>	Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Massa seca M <sub>0</sub> [g]	Massa seca após solução M <sub>1</sub> [g]	Massa Cl <sup>-</sup> retidos [g]	Média [g]	DP [g]	Cl <sup>-</sup> retidos [%]	Média [%]	DP [%]
CI7	03-07 a 18-07-09	164 d	227,327	237,929	10,6	9,3	0,9	4,7	4,2	0,3
CI8			214,013	222,872	8,9			4,1		
CI9			217,066	226,268	9,2			4,2		
CI10			221,094	229,797	8,7			3,9		

1) CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

2) DP – desvio padrão

Nas tabelas II.6 a II.8 apresentam-se os resultados obtidos em cada ciclo e em cada provete da 1ª série ensaiado face aos cloretos, quer em termos de evolução, quer de variação de massa. Os resultados da 2ª série de provetes são apresentados nas tabelas II.9 a II.11.

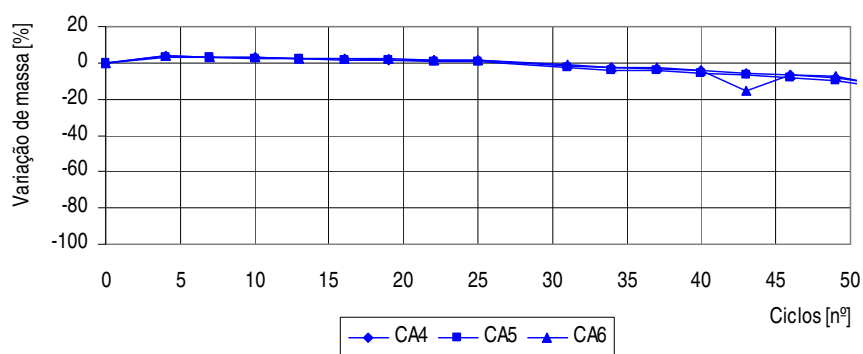
Nas figs. II.1 a II.3 (1ª série) e II.4 a II.6 (2ª série) apresentam-se os respectivos gráficos da variação de massa.

Tabela II.6 – Resistência dos provetes de argamassa CA (1ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [%]	DP [%]
			CA4	CA5	CA6		CA4	CA5	CA6		
18-07-09 a 05-09-09	179 d	0	229,811	213,046	214,173	219,010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	238,618	220,320	221,819	226,919	3,83	3,41	3,57	3,61	0,21
		7	237,593	219,662	221,130	226,128	3,39	3,11	3,25	3,25	0,14
		10	236,162	218,201	219,980	224,781	2,76	2,42	2,71	2,63	0,19
		13	235,160	217,285	219,384	223,943	2,33	1,99	2,43	2,25	0,23
		16	234,935	216,936	218,985	223,619	2,23	1,83	2,25	2,10	0,24
		19	233,844	216,032	218,477	222,784	1,75	1,40	2,01	1,72	0,31
		22	232,963	215,140	217,431	221,845	1,37	0,98	1,52	1,29	0,28
		25	233,116	214,335	217,800	221,750	1,44	0,61	1,69	1,25	0,57
		31	226,429	206,862	211,658	214,983	-1,47	-2,90	-1,17	-1,85	0,92
		34	223,638	204,380	209,503	212,507	-2,69	-4,07	-2,18	-2,98	0,98
		37	222,460	203,877	208,727	211,688	-3,20	-4,30	-2,54	-3,35	0,89
		40	220,556	200,423	204,923	208,634	-4,03	-5,93	-4,32	-4,76	1,02
		43	217,446	199,767	180,529	199,247	-5,38	-6,23	-15,71	-9,11	5,73
		46	214,083	195,066	199,397	202,849	-6,84	-8,44	-6,90	-7,39	0,91
		49	211,620	192,995	197,557	200,724	-7,92	-9,41	-7,76	-8,36	0,91

1) CA: cimento, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão



1) CA: cal aérea e areia

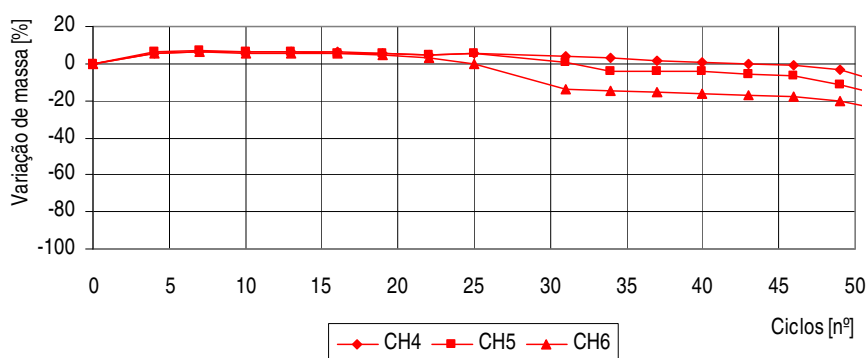
Fig. II.1 – Resistência dos provetes de argamassa CA (1ª série) face aos cloretos – variação de massa

Tabela II.7 – Resistência dos provetes de argamassa CH (1ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [%]	DP [%]
			CH4	CH5	CH6		CH4	CH5	CH6		
18-07-09 a 05-09-09	179 d	0	217,879	212,194	217,618	215,897	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	230,689	225,197	229,396	228,427	5,88	6,13	5,41	5,81	0,36
		7	232,229	227,064	230,771	230,021	6,59	7,01	6,04	6,55	0,48
		10	232,136	225,818	230,447	229,467	6,54	6,42	5,90	6,29	0,34
		13	231,840	225,308	230,111	229,086	6,41	6,18	5,74	6,11	0,34
		16	231,286	224,336	229,274	228,299	6,15	5,72	5,36	5,74	0,40
		19	230,277	223,581	228,605	227,488	5,69	5,37	5,05	5,37	0,32
		22	228,919	222,659	224,938	225,505	5,07	4,93	3,36	4,45	0,95
		25	229,379	223,087	217,125	223,197	5,28	5,13	-0,23	3,40	3,14
		31	225,926	213,852	187,933	209,237	3,69	0,78	-13,64	-3,06	9,28
		34	225,446	203,759	186,602	205,269	3,47	-3,98	-14,25	-4,92	8,90
		37	221,632	203,383	183,426	202,814	1,72	-4,15	-15,71	-6,05	8,87
		40	219,622	202,550	181,880	201,351	0,80	-4,54	-16,42	-6,72	8,82
		43	217,446	199,767	180,529	199,247	-0,20	-5,86	-17,04	-7,70	8,57
		46	215,860	198,164	178,323	197,449	-0,93	-6,61	-18,06	-8,53	8,72
		49	210,381	187,880	174,264	190,842	-3,44	-11,46	-19,92	-11,61	8,24

1) CH: cimento, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão



1) CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

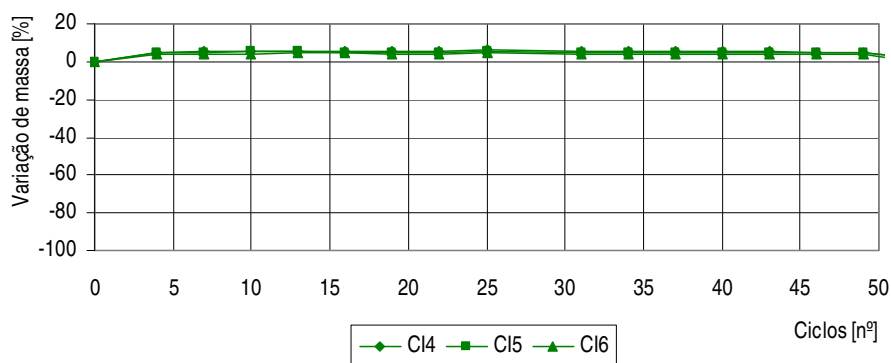
Fig. II.2 – Resistência dos provetes de argamassa CH da 1ª série face aos cloretos – variação de massa

Tabela II.8 – Resistência dos provetes de argamassa CI (1ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [%]	DP [%]
			CI4	CI5	CI6		CI4	CI5	CI6		
18-07-09 a 05-09-09	179 d	0	243,534	231,026	220,028	231,529	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	255,074	241,755	229,121	241,983	4,74	4,64	4,13	4,51	0,33
		7	256,323	242,741	228,835	242,633	5,25	5,07	4,00	4,77	0,67
		10	256,583	242,884	229,348	242,938	5,36	5,13	4,24	4,91	0,59
		13	256,564	242,897	229,531	242,997	5,35	5,14	4,32	4,94	0,54
		16	256,514	242,792	229,590	242,965	5,33	5,09	4,35	4,92	0,51
		19	256,429	242,633	229,393	242,818	5,29	5,02	4,26	4,86	0,54
		22	256,321	242,414	229,105	242,613	5,25	4,93	4,13	4,77	0,58
		25	257,999	243,834	230,361	244,065	5,94	5,54	4,70	5,39	0,64
		31	256,064	242,184	228,781	242,343	5,15	4,83	3,98	4,65	0,60
		34	256,423	242,199	228,643	242,422	5,29	4,84	3,92	4,68	0,70
		37	256,091	242,034	228,586	242,237	5,16	4,76	3,89	4,60	0,65
		40	256,021	241,940	228,459	242,140	5,13	4,72	3,83	4,56	0,66
		43	256,020	241,857	228,279	242,052	5,13	4,69	3,75	4,52	0,70
		46	255,892	241,689	227,888	241,823	5,07	4,62	3,57	4,42	0,77
		49	255,804	241,560	227,930	241,765	5,04	4,56	3,59	4,40	0,74

1) CI: cimento, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão



1) CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. II.3 – Resistência dos provetes de argamassa CI (1ª série) face aos cloretos – variação de massa

Tabela II.9 – Resistência dos provetes de argamassa CA (2ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

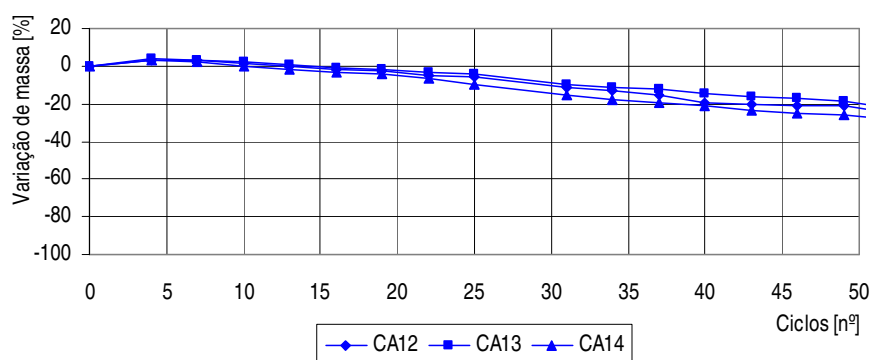
Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [%]	DP [%]
			CA12	CA13	CA14		CA12	CA13	CA14		
18-07-09 a 07-09-09	179 d	0	196,761	214,298	207,352	206,137	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	203,410	222,065	213,851	213,109	3,38	3,62	3,13	3,38	0,25
		7	202,531	220,773	212,185	211,830	2,93	3,02	2,33	2,76	0,38
		10	199,223	218,459	207,322	208,335	1,25	1,94	-0,01	1,06	0,99
		13	197,096	215,372	204,482	205,650	0,17	0,50	-1,38	-0,24	1,01
		16	193,923	213,051	201,160	202,711	-1,44	-0,58	-2,99	-1,67	1,22
		19	191,328	211,081	198,374	200,261	-2,76	-1,50	-4,33	-2,86	1,42
		22	187,089	206,858	193,043	195,663	-4,92	-3,47	-6,90	-5,10	1,72

Tabela II.9 (continuação) – Resistência dos provetes de argamassa CA (2ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [g]	DP [%]
			CA12	CA13	CA14		CA12	CA13	CA14		
18-07-09 a 07-09-09	179 d	25	185,008	205,028	187,160	192,399	-5,97	-4,33	-9,74	-6,68	2,77
		31	174,979	193,884	175,886	181,583	-11,07	-9,53	-15,18	-11,92	2,92
		34	170,357	190,645	171,016	177,339	-13,42	-11,04	-17,52	-13,99	3,28
		37	165,732	187,595	167,539	173,622	-15,77	-12,46	-19,20	-15,81	3,37
		40	158,727	183,045	162,935	168,236	-19,33	-14,58	-21,42	-18,45	3,50
		43	157,434	180,145	159,267	165,615	-19,99	-15,94	-23,19	-19,70	3,63
		46	155,877	177,540	156,113	163,177	-20,78	-17,15	-24,71	-20,88	3,78
		49	155,143	174,615	154,138	161,299	-21,15	-18,52	-25,66	-21,78	3,61

1) CA: cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão



1) CA: cal aérea e areia

Fig. II.4 – Resistência dos provetes de argamassa CA (2ª série) face aos cloretos – variação de massa

Tabela II.10 – Resistência dos provetes de argamassa CH (2ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [%]	DP [%]
			CH7	CH8	CH9		CH7	CH8	CH9		
18-07-09 a 07-09-09	179 d	0	226,939	244,380	236,192	235,837	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	240,045	258,136	249,944	249,375	5,78	5,63	5,82	5,74	0,10
		7	241,103	259,366	250,680	250,383	6,24	6,13	6,13	6,17	0,06
		10	241,375	259,605	250,906	250,629	6,36	6,23	6,23	6,27	0,08
		13	241,482	259,780	250,924	250,729	6,41	6,30	6,24	6,32	0,09
		16	240,777	258,964	250,830	250,190	6,10	5,97	6,20	6,09	0,12
		19	240,922	259,112	250,924	250,319	6,16	6,03	6,24	6,14	0,11
		22	240,797	259,124	250,779	250,233	6,11	6,03	6,18	6,11	0,07
		25	241,376	259,667	251,290	250,778	6,36	6,26	6,39	6,34	0,07
		31	240,542	258,949	250,555	250,015	5,99	5,96	6,08	6,01	0,06
		34	240,370	258,905	250,322	249,866	5,92	5,94	5,98	5,95	0,03
		37	240,200	258,655	250,112	249,656	5,84	5,84	5,89	5,86	0,03
		40	240,314	258,629	250,091	249,678	5,89	5,83	5,88	5,87	0,03
		43	240,281	258,641	250,033	249,652	5,88	5,84	5,86	5,86	0,02
		46	240,518	258,553	250,518	249,863	5,98	5,80	6,07	5,95	0,14
		49	240,210	258,552	250,057	249,606	5,85	5,80	5,87	5,84	0,04

1) CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão

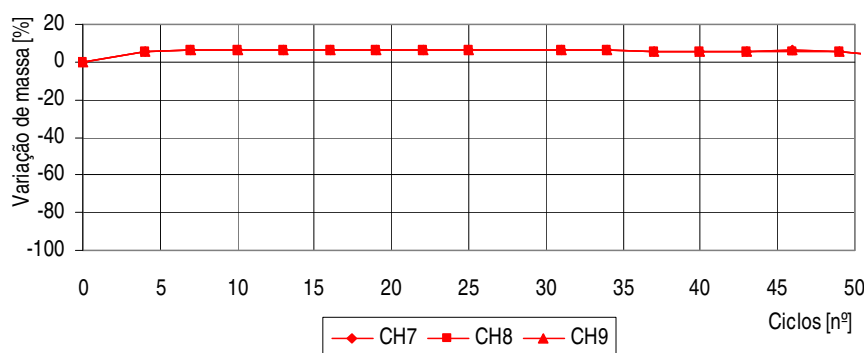


Fig. II.5 – Resistência dos provetes de argamassa CH (2ª série) face aos cloretos – variação de massa

Tabela II.11 – Resistência dos provetes de argamassa CI (2ª série) face aos cloretos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]				Média [g]	Variação de massa [%]				Média [%]	DP [%]
			CI7	CI8	CI9	CI10		CI7	CI8	CI9	CI10		
18-07-09 a 07-09-09	179 d	0	237,929	222,872	226,268	229,707	229,194	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		4	250,762	234,553	239,861	242,620	241,949	5,39	5,24	6,01	5,62	5,57	0,33
		7	252,245	235,241	241,184	243,362	243,008	6,02	5,55	6,59	5,94	6,03	0,43
		10	253,758	235,955	242,784	244,623	244,280	6,65	5,87	7,30	6,49	6,58	0,59
		13	254,345	236,389	243,242	245,278	244,814	6,90	6,06	7,50	6,78	6,81	0,59
		16	254,532	236,844	243,391	245,600	245,092	6,98	6,27	7,57	6,92	6,93	0,53
		19	254,960	237,498	243,549	246,080	245,522	7,16	6,56	7,64	7,13	7,12	0,44
		22	255,016	237,761	243,729	245,762	245,567	7,18	6,68	7,72	6,99	7,14	0,44
		25	255,687	238,402	244,545	246,584	246,305	7,46	6,97	8,08	7,35	7,46	0,46
		31	254,775	237,909	243,314	245,683	245,420	7,08	6,75	7,53	6,95	7,08	0,33
		34	254,734	237,605	243,458	245,404	245,300	7,06	6,61	7,60	6,83	7,03	0,42
		37	254,552	237,604	243,427	245,403	245,247	6,99	6,61	7,58	6,83	7,00	0,42
		40	254,555	237,508	243,386	245,222	245,168	6,99	6,57	7,57	6,75	6,97	0,43
		43	254,443	237,447	243,403	245,100	245,098	6,94	6,54	7,57	6,70	6,94	0,45
		46	254,540	237,640	242,904	245,185	245,067	6,98	6,63	7,35	6,74	6,92	0,32
		49	254,300	237,371	243,065	245,011	244,937	6,88	6,51	7,42	6,66	6,87	0,40

1) CI: cimento, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão

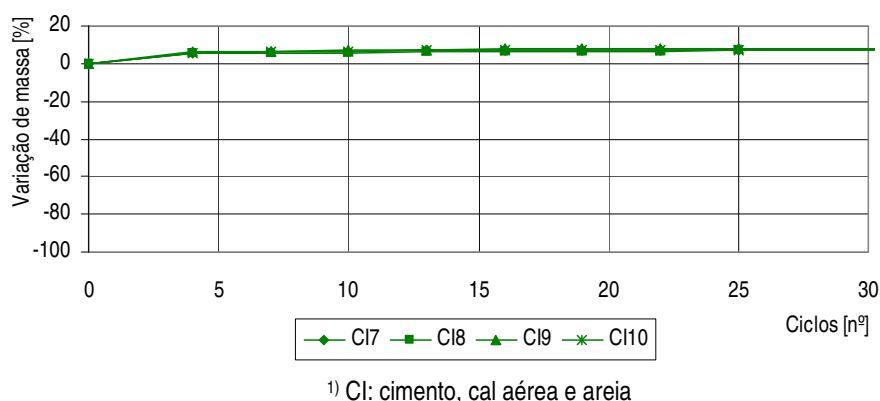


Fig. II.6 – Resistência dos provetes de argamassa CI (2ª série) face aos cloretos – variação de massa

## 2.2 – Resistência aos sulfatos

Nas tabelas II.12 a I.14 apresentam-se os resultados obtidos em cada ciclo e em cada provete de argamassa CA, CH e CI ensaiado face aos sulfatos, quer em termos de evolução, quer de variação de massa.

Nas figs. I.7 a I.9 apresentam-se os respectivos gráficos da variação de massa.

Tabela II.12 – Resistência dos provetes de argamassa CA (1ª série) face aos sulfatos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [g]	DP [%]
			CA4-2	CA5-2	CA6-2		CA4-2	CA5-2	CA6-2		
25-04-09 a 25-05-09	95 d	0	208,408	217,503	218,712	214,874	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		1	209,844	219,094	220,342	216,427	0,69	0,73	0,75	0,72	0,03
		2	210,929	220,219	221,329	217,492	1,21	1,25	1,20	1,22	0,03
		3	211,755	220,963	221,997	218,238	1,61	1,59	1,50	1,57	0,06
		4	212,390	221,602	222,640	218,877	1,91	1,88	1,80	1,86	0,06
		5	212,951	222,022	223,323	219,432	2,18	2,08	2,11	2,12	0,05
		6	213,252	222,162	223,619	219,678	2,32	2,14	2,24	2,24	0,09
		7	212,873	222,120	223,948	219,647	2,14	2,12	2,39	2,22	0,15
		8	211,399	220,903	223,530	218,611	1,44	1,56	2,20	1,73	0,41
		9	209,477	217,454	222,668	216,533	0,51	-0,02	1,81	0,77	0,94
		10	207,109	215,658	220,763	214,510	-0,62	-0,85	0,94	-0,18	0,97
		11	204,513	213,147	218,239	211,966	-1,87	-2,00	-0,22	-1,36	1,00
		12	200,988	210,102	215,304	208,798	-3,56	-3,40	-1,56	-2,84	1,11
		13	197,392	206,512	209,931	204,612	-5,29	-5,05	-4,01	-4,78	0,68
		14	194,264	202,613	205,825	200,901	-6,79	-6,85	-5,89	-6,51	0,53
		15	187,455	198,377	201,118	195,650	-10,05	-8,79	-8,04	-8,96	1,02
		16	184,617	194,489	197,082	192,063	-11,42	-10,58	-9,89	-10,63	0,76
		17	180,652	189,255	189,282	186,396	-13,32	-12,99	-13,46	-13,25	0,24
		18	177,781	185,884	184,355	182,673	-14,70	-14,54	-15,71	-14,98	0,64
		19	174,462	182,656	180,651	179,256	-16,29	-16,02	-17,40	-16,57	0,73
		20	170,912	178,740	177,059	175,570	-17,99	-17,82	-19,04	-18,29	0,66



	21	165,048	171,520	172,754	169,774	-20,81	-21,14	-21,01	-20,99	0,17
	22	162,034	166,112	163,046	163,731	-22,25	-23,63	-25,45	-23,78	1,61
	23	158,575	162,318	141,245	154,046	-23,91	-25,37	-35,42	-28,23	6,27
	24	155,167	158,361	98,786	137,438	-25,55	-27,19	-54,83	-35,86	16,45
	25	152,435	155,921	93,458	133,938	-26,86	-28,31	-57,27	-37,48	17,15
	26	149,958	153,063	87,429	130,150	-28,05	-29,63	-60,03	-39,23	18,02
	27	146,916	149,990	83,759	126,888	-29,51	-31,04	-61,70	-40,75	18,16
	28	143,554	145,593	69,026	119,391	-31,12	-33,06	-68,44	-44,21	21,01
	29	110,058	97,406	66,858	91,441	-47,19	-55,22	-69,43	-57,28	11,26
	30	85,656	79,325	65,892	76,958	-58,90	-63,53	-69,87	-64,10	5,51

1) CA: cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão

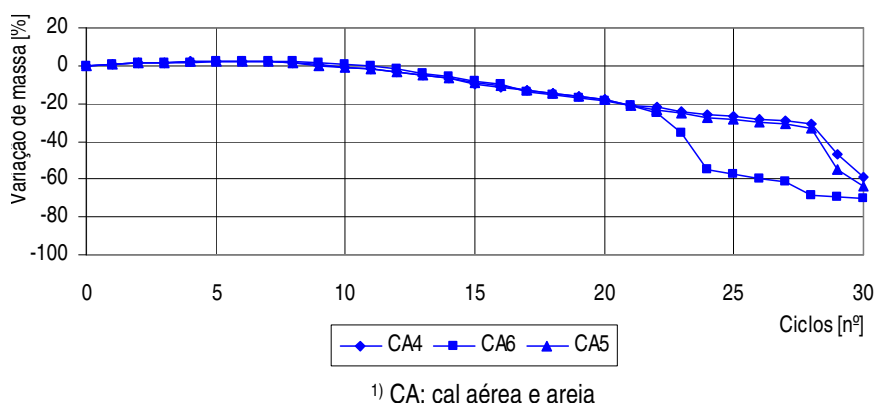


Fig. II.7 – Resistência dos provetes de argamassa CA (1ª série) face aos sulfatos – variação de massa

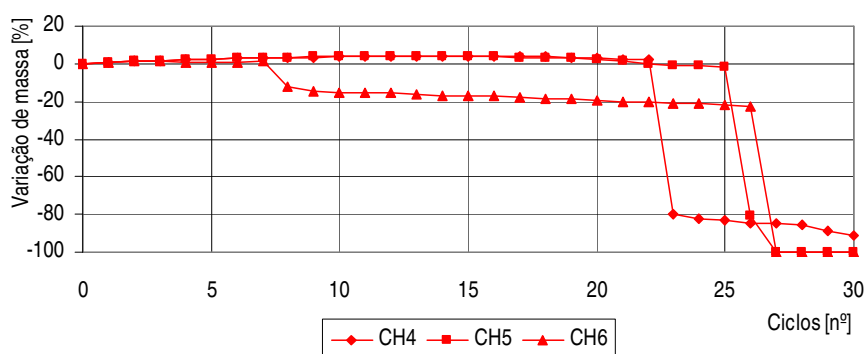
Tabela II.13 – Resistência dos provetes de argamassa CH (1ª série) face aos sulfatos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [g]	DP [%]
			CH4-2	CH5-2	CH6-2		CH4-2	CH5-2	CH6-2		
25-04-09 a 25-05-09	95 d	0	220,016	223,403	219,416	220,945	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		1	221,463	224,945	220,931	222,446	0,66	0,69	0,69	0,68	0,02
		2	222,823	226,296	222,166	223,762	1,28	1,29	1,25	1,27	0,02
		3	223,937	227,402	223,235	224,858	1,78	1,79	1,74	1,77	0,03
		4	224,875	228,360	221,494	224,910	2,21	2,22	0,95	1,79	0,73
		5	225,655	229,215	221,552	225,474	2,56	2,60	0,97	2,05	0,93
		6	226,225	229,836	221,600	225,887	2,82	2,88	1,00	2,23	1,07
		7	226,659	230,378	222,091	226,376	3,02	3,12	1,22	2,45	1,07
		8	227,131	230,853	192,322	216,769	3,23	3,33	-12,35	-1,93	9,03
		9	227,648	231,322	186,984	215,318	3,47	3,54	-14,78	-2,59	10,56
		10	227,997	231,790	186,149	215,312	3,63	3,75	-15,16	-2,59	10,88
		11	228,350	231,931	185,655	215,312	3,79	3,82	-15,39	-2,59	11,08
		12	228,731	232,112	185,100	215,314	3,96	3,90	-15,64	-2,59	11,30
		13	228,876	232,233	183,804	214,971	4,03	3,95	-16,23	-2,75	11,67
		14	229,010	232,286	182,705	214,667	4,09	3,98	-16,73	-2,89	11,99
		15	228,967	232,117	182,339	214,474	4,07	3,90	-16,90	-2,98	12,06
		16	228,991	231,830	181,720	214,180	4,08	3,77	-17,18	-3,11	12,19
		17	228,414	231,043	180,226	213,228	3,82	3,42	-17,86	-3,54	12,40
		18	228,177	230,460	178,766	212,468	3,71	3,16	-18,53	-3,89	12,68

		19	227,353	229,635	177,903	211,630	3,33	2,79	-18,92	-4,27	12,69
		20	226,206	228,252	176,732	210,397	2,81	2,17	-19,45	-4,82	12,67
		21	224,689	226,462	175,575	208,909	2,12	1,37	-19,98	-5,50	12,55
		22	224,932	223,518	174,711	207,720	2,23	0,05	-20,37	-6,03	12,47
		23	44,800	221,947	173,828	146,858	-79,64	-0,65	-20,78	-33,69	41,05
		24	38,111	220,718	172,722	143,850	-82,68	-1,20	-21,28	-35,05	42,45
		25	36,348	219,498	171,460	142,435	-83,48	-1,75	-21,86	-35,69	42,59
		26	34,218	42,714	170,349	82,427	-84,45	-80,88	-22,36	-62,56	34,86
		27	33,160	0,000	0,000	11,053	-84,93	-100,00	-100,00	-94,98	8,70
		28	32,607	0,000	0,000	10,869	-85,18	-100,00	-100,00	-95,06	8,56
		29	24,415	0,000	0,000	8,138	-88,90	-100,00	-100,00	-96,30	6,41
		30	18,740	0,000	0,000	6,247	-91,48	-100,00	-100,00	-97,16	4,92

1) CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão



1) CH: cal hidráulica, cal aérea e areia

Fig. II.8 – Resistência dos provetes de argamassa CH (1ª série) face aos sulfatos – variação de massa

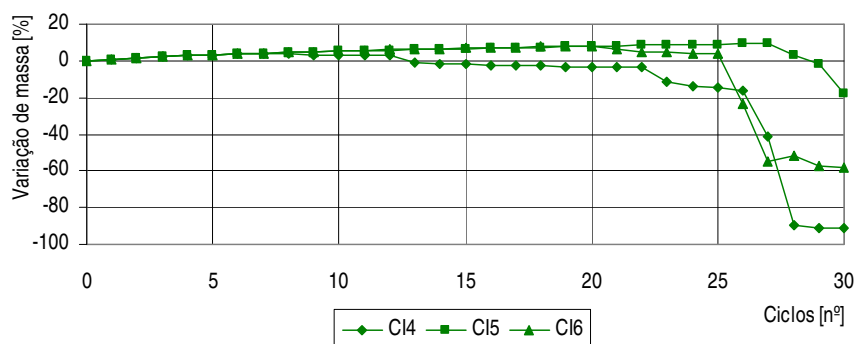
Tabela II.14 – Resistência dos provetes de argamassa CI (1ª série) face aos sulfatos – evolução e variação de massa

Data do ensaio	Idade no início do ensaio	Ciclos [nº]	Evolução de massa [g]			Média [g]	Variação de massa [%]			Média [g]	DP [%]
			CI4-2	CI5-2	CI6-2		CI4-2	CI5-2	CI6-2		
25-04-09 a 25-05-09	95 d	0	206,475	221,804	230,088	219,456	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		1	207,786	223,200	231,486	220,824	0,63	0,63	0,61	0,62	0,01
		2	209,242	224,816	233,117	222,392	1,34	1,36	1,32	1,34	0,02
		3	210,731	226,444	234,757	223,977	2,06	2,09	2,03	2,06	0,03
		4	212,082	227,940	236,284	225,435	2,72	2,77	2,69	2,72	0,04
		5	213,230	229,207	237,618	226,685	3,27	3,34	3,27	3,29	0,04
		6	214,200	230,190	238,720	227,703	3,74	3,78	3,75	3,76	0,02
		7	214,977	231,119	239,760	228,619	4,12	4,20	4,20	4,17	0,05
		8	213,994	231,974	240,752	228,907	3,64	4,59	4,63	4,29	0,56
		9	213,329	232,765	241,670	229,255	3,32	4,94	5,03	4,43	0,96
		10	212,899	233,527	242,540	229,655	3,11	5,29	5,41	4,60	1,29
		11	212,558	234,183	243,392	230,044	2,95	5,58	5,78	4,77	1,58
		12	212,327	234,854	244,068	230,416	2,83	5,88	6,08	4,93	1,82
		13	204,691	235,513	244,766	228,323	-0,86	6,18	6,38	3,90	4,13
		14	203,067	236,051	245,407	228,175	-1,65	6,42	6,66	3,81	4,73
		15	202,300	236,644	246,054	228,333	-2,02	6,69	6,94	3,87	5,10
		16	201,738	237,138	246,651	228,509	-2,29	6,91	7,20	3,94	5,40
		17	200,632	237,580	247,224	228,479	-2,83	7,11	7,45	3,91	5,84
		18	200,559	238,123	247,803	228,828	-2,87	7,36	7,70	4,06	6,00

	19	200,260	238,728	248,413	229,134	-3,01	7,63	7,96	4,19	6,24
	20	200,013	239,234	249,010	229,419	-3,13	7,86	8,22	4,32	6,45
	21	199,757	239,746	243,897	227,800	-3,25	8,09	6,00	3,61	6,04
	22	199,368	240,301	241,736	227,135	-3,44	8,34	5,06	3,32	6,08
	23	183,248	240,828	240,424	221,500	-11,25	8,58	4,49	0,61	10,47
	24	177,908	241,507	239,639	219,685	-13,84	8,88	4,15	-0,27	11,99
	25	175,482	242,008	238,944	218,811	-15,01	9,11	3,85	-0,68	12,68
	26	173,419	242,528	176,760	197,569	-16,01	9,34	-23,18	-9,95	17,09
	27	121,381	243,130	104,418	156,310	-41,21	9,61	-54,62	-28,74	33,88
	28	22,102	228,115	110,330	120,182	-89,30	2,85	-52,05	-46,17	46,35
	29	18,747	218,512	98,703	111,987	-90,92	-1,48	-57,10	-49,84	45,16
	30	18,740	181,857	96,709	99,102	-90,92	-18,01	-57,97	-55,63	36,51

1) CI: cimento, cal aérea e areia

2) DP: desvio padrão



1) CI: cimento, cal aérea e areia

Fig. II.9 – Resistência dos provetes de argamassa CI (1ª série) face aos sulfatos – variação de massa

Constata-se que os valores obtidos em cada provete e em cada ensaio, são representativos. As maiores diferenças ocorrem entre provetes ensaiados aos sulfatos, em que, por vezes, a rotura ocorre desfasada entre provetes, muito devido ao manuseamento a que esses provetes são sujeitos, pelo que essas diferenças são, de algum modo, expectáveis.

